

ARTHUR HENRIQUE DE ANDRADE MELANI

THIAGO DA SILVA PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA CNC PARA
PRODUÇÃO DE PEÇAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS POR
ENROLAMENTO FILAMENTAR**

São Paulo

2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Melani, Arthur Henrique de Andrade

Desenvolvimento de uma máquina CNC para produção de peças de materiais compósitos por enrolamento filamentar / A.H.A. Melani, T.S. Pereira. -- São Paulo, 2012.

127 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Materiais compósitos de fibras 2. Engenharia mecânica 3. Materiais não metálicos I. Pereira, Thiago da Silva II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. t.

DEDICATÓRIA

Dedicamos esta monografia aos nossos pais, que sempre nos apoiaram nos momentos difíceis, não medindo esforços para nos ajudar, e tendo como prioridade, muitas vezes, a nossa felicidade em vez da deles.

Aos professores da Escola Politécnica da USP, que têm se esforçado de forma notável para garantir a qualidade do ensino de engenharia

Aos nossos amigos, que nos proporcionaram grandes momentos durante todo o curso de graduação.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Júlio Cezar Adamowski, pela confiança depositada, pelos esclarecimentos prestados e pela paciência perante todas as nossas dúvidas, por mais banais que pudessem parecer.

Ao Eng. Rubens Rossi Ferramenta pela atenção e apoio prestados, fornecendo sugestões ao projeto e nos auxiliando nos contatos que tivemos.

Aos técnicos da Escola Politécnica, Adilson Fernandes Felix Filho e Gilberto Garcia, pelo auxílio na fabricação e montagem do projeto, pelas ideias e sugestões que otimizaram tanto o processo de produção quanto o projeto em si e pela demonstração de comprometimento, não só com a qualidade final do trabalho, mas também com a transmissão de seus conhecimentos na área.

RESUMO

Enrolamento filamentar é uma técnica de fabricação utilizada para a criação de peças de materiais compósitos, em geral cilíndricas, que possuam alta resistência e baixo peso. A máquina responsável pela execução desta técnica possui um mandril, ou molde, onde fios de materiais compósitos, impregnados com determinada resina, são enrolados com tensões e ângulos bem definidos.

Através de constantes avanços tecnológicos, a utilização deste tipo de técnica teve seu custo reduzido, garantindo um melhor aproveitamento das vantagens dos materiais compósitos. Este trabalho tem como objetivo o projeto e construção de uma máquina CNC para produção de peças, com esse tipo de material, por enrolamento filamentar. A máquina projetada terá quatro graus de liberdade, tornando-a ideal para a produção de tubos ou vasos de pressão.

O sistema de controle da máquina utilizará o Linux CNC. O de acionamento utilizará servo-motores conectados a servo-drivers, que são capazes de acionar os motores controlando o torque, a velocidade ou a posição de forma precisa. Já o mecânico é projetado visando assegurar a precisão de movimentos, utilizando, portanto, elementos precisos, como redutor harmônico, fusos de esferas recirculantes, entre outros.

ABSTRACT

Filament winding is a fabrication technique used for manufacturing composite material structures, usually cylindrical, that have high mechanical strength and low weight. The machine used for the execution of this technique has a mandrel, or mould, where composite wires, impregnated with some resin, are wound with defined tension and angle.

Through constant technological advances, the use of such technique had its cost reduced, ensuring a better use of advantages of composite materials. This dissertation aims to design and build a CNC machine to produce structures, with this type of material, by filament winding. The projected machine has four degrees of freedom, making it ideal for the production of tubes or pressure vessels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema ilustrativo do processo de pultrusão [5].....	12
Figura 2 - Esquema do processo de moldagem por transferência de resina [adaptado de 6]	13
Figura 3 - Esquema do processo de moldagem por transferência de resina a vácuo [adaptado de 7].....	14
Figura 4 - Esquema ilustrativo da moldagem por compressão [8].....	15
Figura 5 - Esquema ilustrativo da laminação manual [adaptado de 9].....	15
Figura 6 - Máquina CNC de Enrolamento Filamentar [5]	16
Figura 7 - (i) Máquina de enrolamento filamentar; (ii) Representação do enrolamento helicoidal; (iii) Representação do enrolamento polar [11].....	17
Figura 8 - Solução 1	21
Figura 9 - Solução 2	21
Figura 10 - Solução 3	21
Figura 11 - Primeiro Projeto	22
Figura 12 - Projeto Final.....	23
Figura 13 - Acionamento do Mandril no Projeto Final	24
Figura 14 - Controle de Posição do Fio no Projeto Final.....	25
Figura 15- Sistema de apoio do mandril.....	26
Figura 16 - Esquema de montagem para movimentação do eixo árvore	27
Figura 17 - Sistema de movimentação transversal e longitudinal	29
Figura 18 - Estimativa da posição angular do sistema que gira a fibra	31
Figura 19 - Esquema de fixação do mancal do sistema de movimentação do mandril	34
Figura 20 - Torque em função do tempo para um ciclo de trabalho	35
Figura 21 - Rotação em função do tempo	35
Figura 22 - Ciclo de trabalho incluindo o torque médio	36
Figura 23 - 1º Modo de Vibrar	37
Figura 24 - 2º Modo de Vibrar	38
Figura 25 - 3º Modo de Vibrar	38
Figura 26 - 4º Modo de Vibrar	39

Figura 27 - 5º Modo de Vibrar	39
Figura 28 - 6º Modo de Vibrar	39
Figura 29 - 7º Modo de Vibrar	40
Figura 30 - 8º Modo de Vibrar	40
Figura 31 - Tensão de Von Mises	41
Figura 32 - Deformação	41
<i>Figura 33 – Esquema Elétrico Geral</i>	43
Figura 34 - Configuração no painel do stepconf, ferramenta de configuração do Linux CNC	46
Figura 35 - Ligação dos servo-drivers à rede elétrica [adaptado de 21].....	49
Figura 36 - Diagrama esquemático do Circuito de proteção	50
Figura 37 – Esquema de ligações do cabo PC/Placa de interface.....	51
Figura 38 – Esquema de ligações para o driver do motor de passo	52
Figura 39 Cabo para conexão entre a placa de interface e os servo-drivers ...	52
Figura 40 - Vista superior da máquina	54
Figura 41 - Vista lateral da máquina.....	55
Figura 42 - Detalhe do banho de resina e do sistema de posicionamento da fibra	55
Figura 43 - Detalhe do sistema de acionamento do mandril	56
Figura 44 - Detalhe do sistema de posicionamento da fibra	56
Figura 45 - Gabinete que abriga o sistema elétrico.....	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. Materiais Compósitos.....	11
2.2. Técnicas de fabricação utilizando Compósitos de Matriz Polimérica	12
2.2.1. Pultrusão.....	12
2.2.2. Moldagem por transferência de resina.....	13
2.2.3. Moldagem por transferência de resina a vácuo	13
2.2.4. Moldagem por compressão	14
2.2.5. Laminação Manual.....	15
2.2.6. Enrolamento Filamentar (<i>"Filament Winding"</i>)	16
3. PROJETO.....	19
3.1. Requisitos de Projeto	19
3.2. Projeto Mecânico	20
3.2.1 Topologia da Máquina	20
3.2.1.1. Primeiro Projeto	22
3.2.1.2. Projeto Final.....	23
3.2.2 Estudo de Viabilidade do Projeto	26
3.2.2.1 Dimensionamento dos Motores	27
3.2.2.3. Frequência natural associada a torções no sistema de acionamento do mandril.....	32
3.2.2.4. Frequências naturais de vibração da estrutura.....	32
3.2.2.5. Resistência na fixação do mancal do sistema de acionamento	33
3.2.2.6. Redutor Harmônico - Eixo árvore.....	34
3.2.2.7. Obtenção das frequências naturais via software.....	36
3.2.2.8. Análise estática via software	40
3.3. Projeto Elétrico	42

3.3.1 Sistema de Controle.....	44
3.3.2 Computador	44
3.3.2.1. Requisitos de Hardware.....	45
3.3.2.2. Configuração dos pinos da porta paralela	46
3.3.3. Circuito de Interface	47
3.3.4. Chaves de fim de curso	48
3.3.5. Circuito de proteção	48
3.3.6 Conexões dos componentes.....	51
4. RESULTADOS	54
5. CONCLUSÕES	59
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
Apêndice A.....	62
Apêndice B.....	63
Apêndice C.....	72

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos estão sendo empregados cada vez mais em substituição aos materiais tradicionais, cujas características individuais não atendem às crescentes exigências de melhor desempenho, segurança, economia e durabilidade. Os materiais compósitos vêm sendo testados e têm apresentado desempenho superior ao de estruturas metálicas convencionais [1].

Sendo assim, é cada vez mais necessário conhecer as técnicas para a utilização deste tipo de material. A otimização do aproveitamento das características dos materiais compósitos em processos de fabricação garante produtos competitivos perante o mercado.

Uma destas técnicas, conhecida como Enrolamento Filamentar, ou "Filament Winding", é uma técnica de fabricação utilizada para a criação de peças de materiais compósitos, em geral cilíndricas, que possuam alta resistência e baixo peso.

A máquina responsável pela execução desta técnica possui um mandril, ou molde, onde fios de materiais compósitos, impregnados com determinada resina, são enrolados com tensões e ângulos bem definidos. Para obtenção de um produto final com alta resistência, é necessário um controle preciso do padrão de enrolamento, tensão no fio e direção dos filamentos, o que só pode ser alcançado com a utilização de uma máquina CNC.

Por permitir a fabricação de produtos resistentes e leves, essa técnica vem sendo muito utilizada para a produção de peças nos mais diversos setores, tais como aeroespacial, naval e militar.

Este trabalho tem como objetivo o projeto e construção de uma máquina CNC para produção de peças feitas com materiais compósitos por enrolamento filamentar. A máquina projetada terá quatro graus de liberdade, tornando-a ideal para a produção de tubos ou vasos de pressão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Materiais Compósitos

Com o avanço tecnológico, os requisitos exigidos dos materiais comuns também sofreram alterações, o que levou ao aparecimento de materiais capazes de corresponder às novas exigências. Os materiais compósitos têm posição de destaque nesse cenário, pois possuem propriedades que os tornam extremamente competitivos [1].

São formados por uma estrutura de reforço inserida em uma matriz, onde o produto final apresenta uma combinação de propriedades dos seus constituintes. O reforço geralmente é feito por fibras, que apresentam alta resistência à tração e a matriz une as fibras de forma a permitir que as tensões sejam transferidas para a fibra, resultando num material reforçado [2].

O compósito é projetado de modo que as cargas a que a estrutura é submetida em serviço sejam suportadas pelo reforço. Suas propriedades dependem da matriz, do reforço e da interface. Desta forma muitas variáveis precisam ser consideradas ao se projetar um compósito: o tipo de matriz (metálica, cerâmica e polimérica), o tipo de reforço (fibras ou partículas), suas proporções relativas, a geometria do reforço, método de cura e a natureza da interface. Cada uma destas variáveis deve ser cuidadosamente controlada a fim de produzir um material estrutural otimizado para as circunstâncias nas quais será usado.

Os compósitos de matriz metálica, polimérica e cerâmica ocupam posições de destaque no campo dos materiais avançados, graças às suas elevadas resistência e rigidez específicas. Os compósitos avançados reduzem problemas de fadiga, possuem maior flexibilidade, resistência à corrosão e ao desgaste, o que conduz a custos mais baixos de ciclo de vida do produto [1].

Além disso, entre as razões que fazem esse tipo de material ter seu uso crescente estão as suas propriedades à temperatura ambiente, a sua facilidade de fabricação e seu custo [2].

2.2. Técnicas de fabricação utilizando Compósitos de Matriz Polimérica

Dependendo da geometria, quantidade a ser fabricada e das características mecânicas desejadas, podem ser utilizados diferentes técnicas de fabricação. Citamos algumas dessas técnicas abaixo:

2.2.1. Pultrusão

Pultrusão é um processo automatizado de manufatura, que consiste em “puxar” as fibras embebidas na resina através de uma fiação ou molde. O aquecimento do molde, que tem a forma da seção transversal do perfil desejado, provoca polimerização (cura) da resina durante a passagem no seu interior. O processo foi desenvolvido por Goldsworthy [3]

A maior aplicação do processo de pultrusão é na fabricação de peças cujo perfil tem seção transversal prismática. O processo de manufatura por pultrusão é adequado principalmente para produção em grande escala. [4]

A Figura 1 mostra esquematicamente como é esse processo.

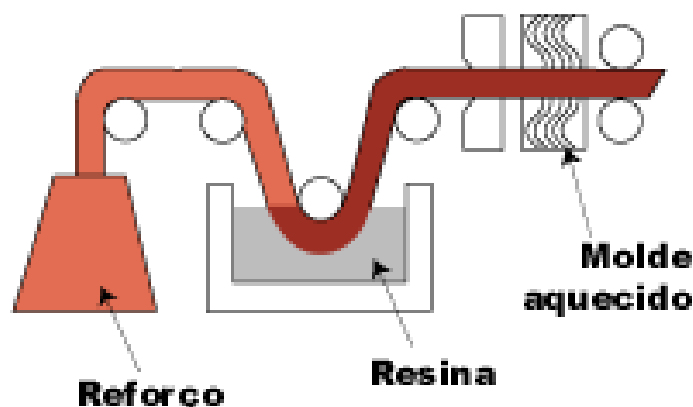
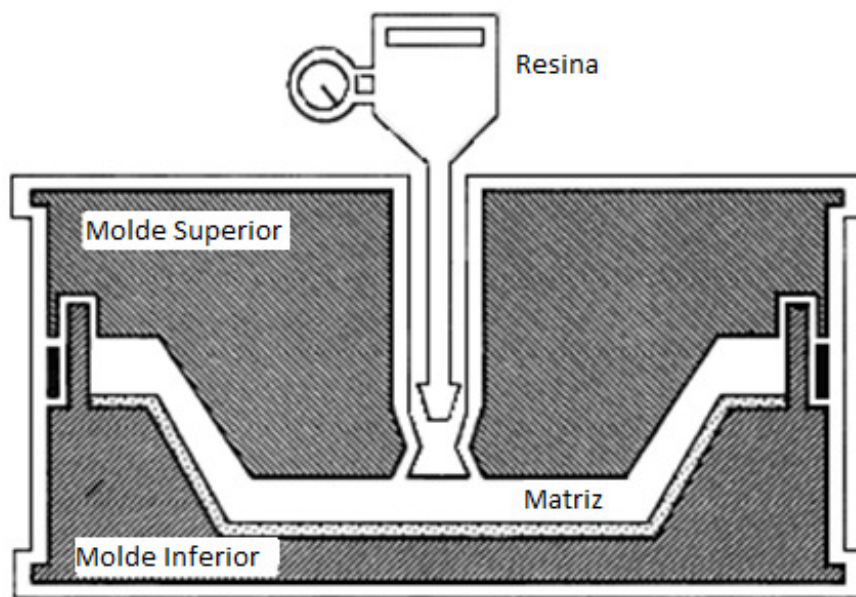


Figura 1 - Esquema ilustrativo do processo de pultrusão [5]

2.2.2. Moldagem por transferência de resina

Nesse processo as camadas de fibra ou fibras pré-impregnadas são colocadas em um molde, pressurizadas e a resina é injetada de modo a ocupar os espaços vazios no molde (Figura 2). Trata-se de um processo que oferece baixo desperdício, reduz os gastos com usinagem de acabamento do produto e pode ser automatizado. A maior limitação desse processo é que a manufatura de formas complexas exige muita tentativa e erro para garantir que a resina se propague ao longo do molde adequadamente [6].



*Figura 2 - Esquema do processo de moldagem por transferência de resina
[adaptado de 6]*

2.2.3. Moldagem por transferência de resina a vácuo

Conceitualmente, esse processo é similar ao mostrado anteriormente (moldagem por transferência de resina), mas difere em alguns aspectos. A diferença mais significativa é que esse processo é realizado em um molde hermeticamente fechado, e utiliza-se uma bomba de vácuo para garantir que sejam minimizados os vazios na mistura. A quantidade de resina a ser injetada na fibra depende da permeabilidade do laminado e do tipo de fibra. A viscosidade da resina deve ser baixa. Trata-se de um processo capaz de

produzir produtos de alta qualidade, além de ser seguro em relação à saúde do operador, pois todo o sistema opera sob vácuo.

Entre as aplicações típicas dessa tecnologia estão assentos de trens, peças complexas de barcos, aviões e automóveis [7].

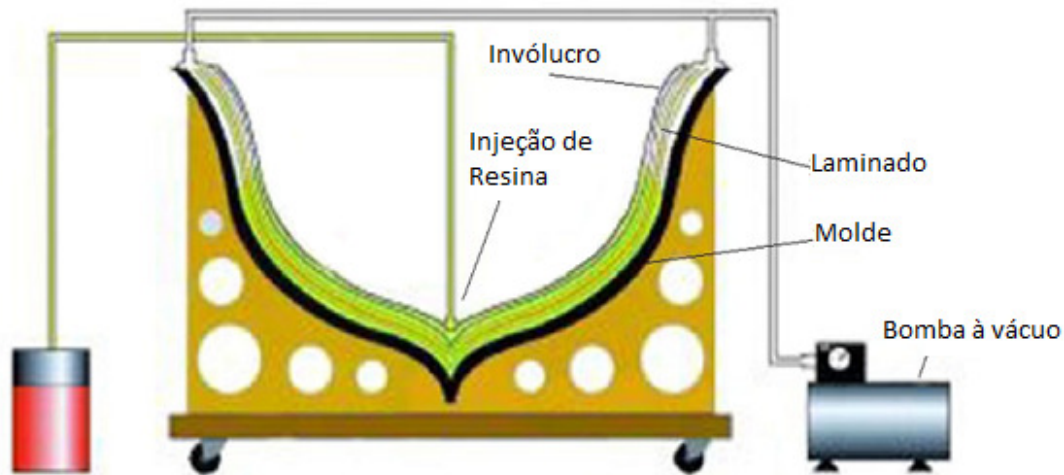


Figura 3 - Esquema do processo de moldagem por transferência de resina a vácuo [adaptado de 7]

2.2.4. Moldagem por compressão

Nesse processo a resina termoendurecível, que pode ser pré-aquecida, é introduzida num molde quente contendo uma ou mais cavidades. A parte superior do molde desce e comprime a resina plástica; a pressão aplicada e o calor amolecem a resina e a mistura liquefeita é forçada a encher a cavidade ou cavidades do molde.

Após o tempo necessário para completar a formação de ligações cruzadas na resina termoendurecível, finalmente a peça é ejetada.

Entre as vantagens desse processo estão: a relativa simplicidade, os custos de fabricação dos moldes e a possibilidade de produção de peças de grandes dimensões. [8].

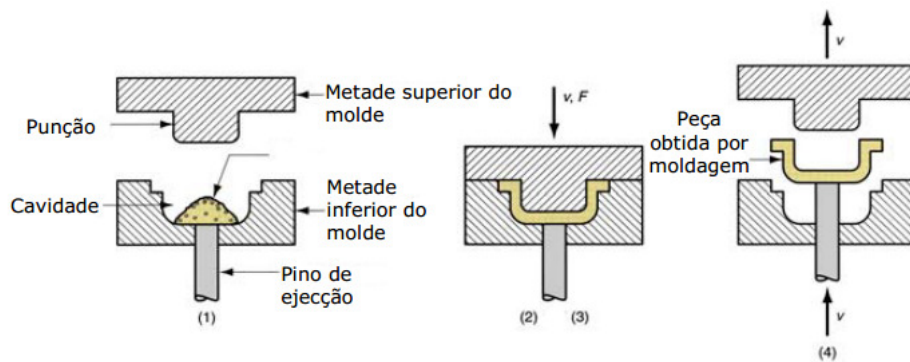


Figura 4 - Esquema ilustrativo da moldagem por compressão [8]

2.2.5. Laminação Manual

No processo de laminação manual as mantas e/ou os tecidos de fibras são colocados manualmente sobre o molde e impregnados com resina catalisada e acelerada. A resina, no estado líquido, é aplicada manualmente com rolos ou pincéis, utilizados no auxílio da impregnação e na retirada de bolhas de ar.

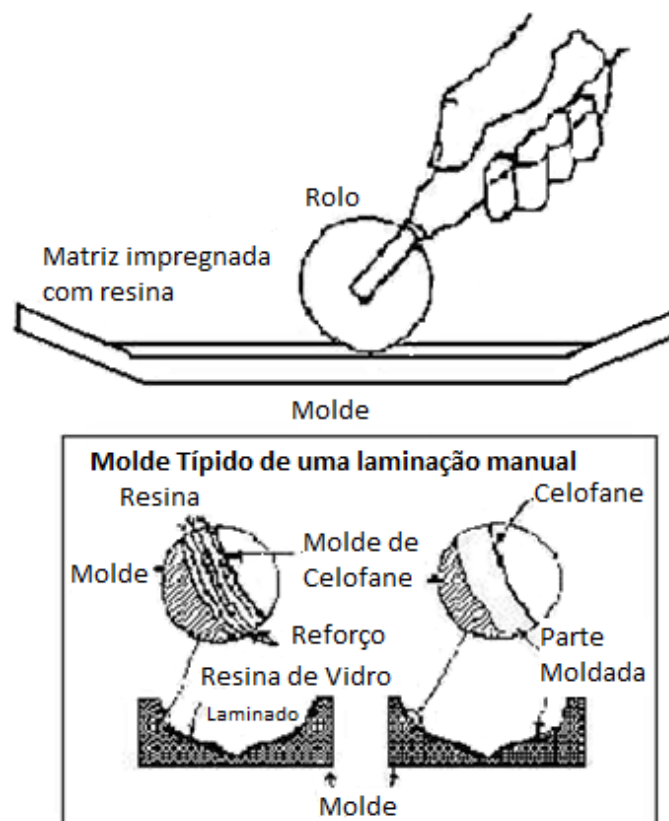


Figura 5 - Esquema ilustrativo da laminação manual [adaptado de 9]

Esse processo, mostrado na Figura 5, consiste em aplicar sucessivamente dentro da superfície do molde: inicialmente um agente desmoldante, uma camada de resina líquida termofixa e uma camada de reforço que deve ser impregnado na resina com o auxílio de um rolo ou pincel. Esse processo deve ser repetido até que se tenha a espessura desejada do laminado [9]

2.2.6. Enrolamento Filamentar (*"Filament Winding"*)

Enrolamento filamentar é um processo no qual as fibras, depois de mergulhadas em uma resina, são posicionadas em um mandril rotativo. Esse processo é feito com a fibra sob tensão controlada, e esta é enrolada seguindo um padrão específico, que estabelece um ângulo de enrolamento. A figura 6 apresenta um exemplo de máquina CNC de enrolamento filamentar.

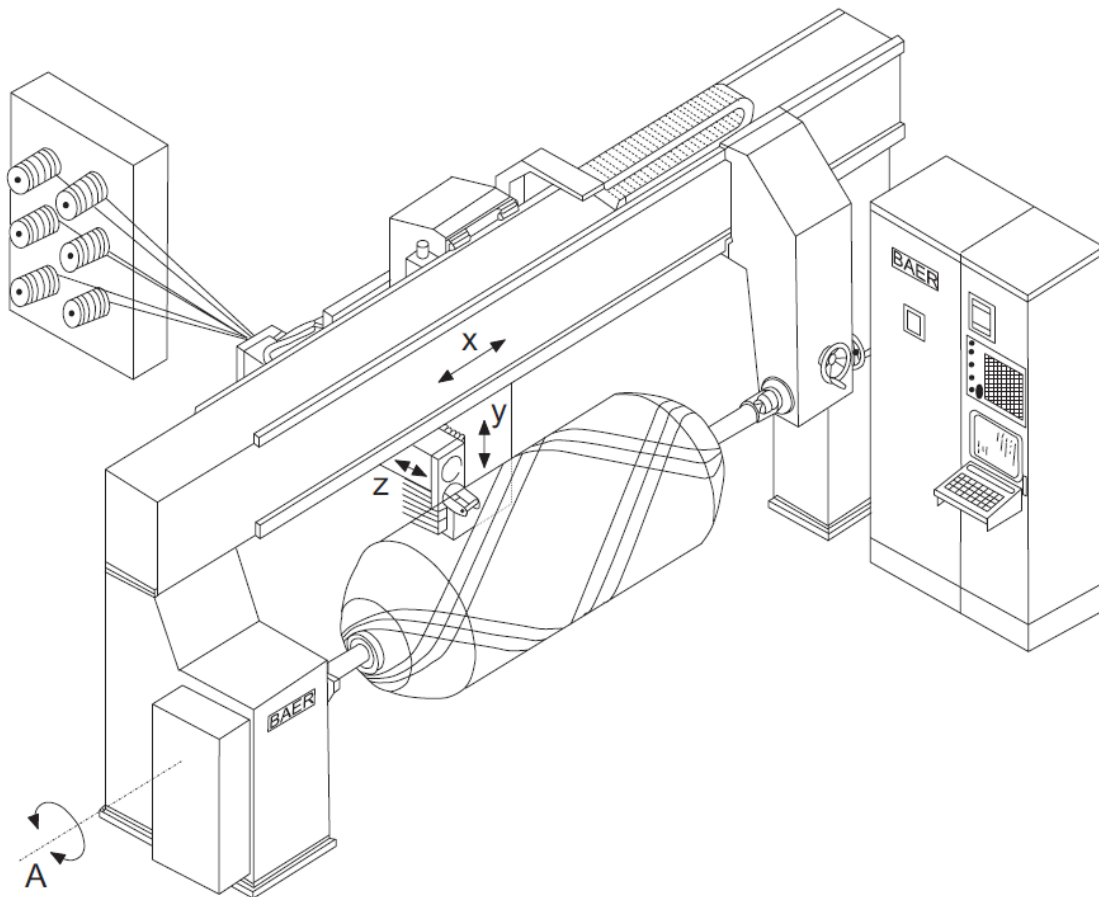


Figura 6 - Máquina CNC de Enrolamento Filamentar [5]

O ângulo de enrolamento é obtido por meio do controle das velocidades do mandril e do carretel de fibra. Ângulo de enrolamento é o ângulo entre as fibras e o eixo de rotação do mandril. Esse ângulo pode ser qualquer um diferente de 0° , ou seja, só não é possível enrolar a fibra paralelamente ao eixo de rotação. [4].

As camadas aproximadamente perpendiculares ao eixo de rotação são chamadas de camadas circunferências. Camadas com ângulos de enrolamento entre 5° e 80° são chamadas de helicoidais, e camadas aproximadamente paralelas ao eixo de rotação são chamadas de polares. A figura 7 ilustra os diferentes tipos de enrolamento.

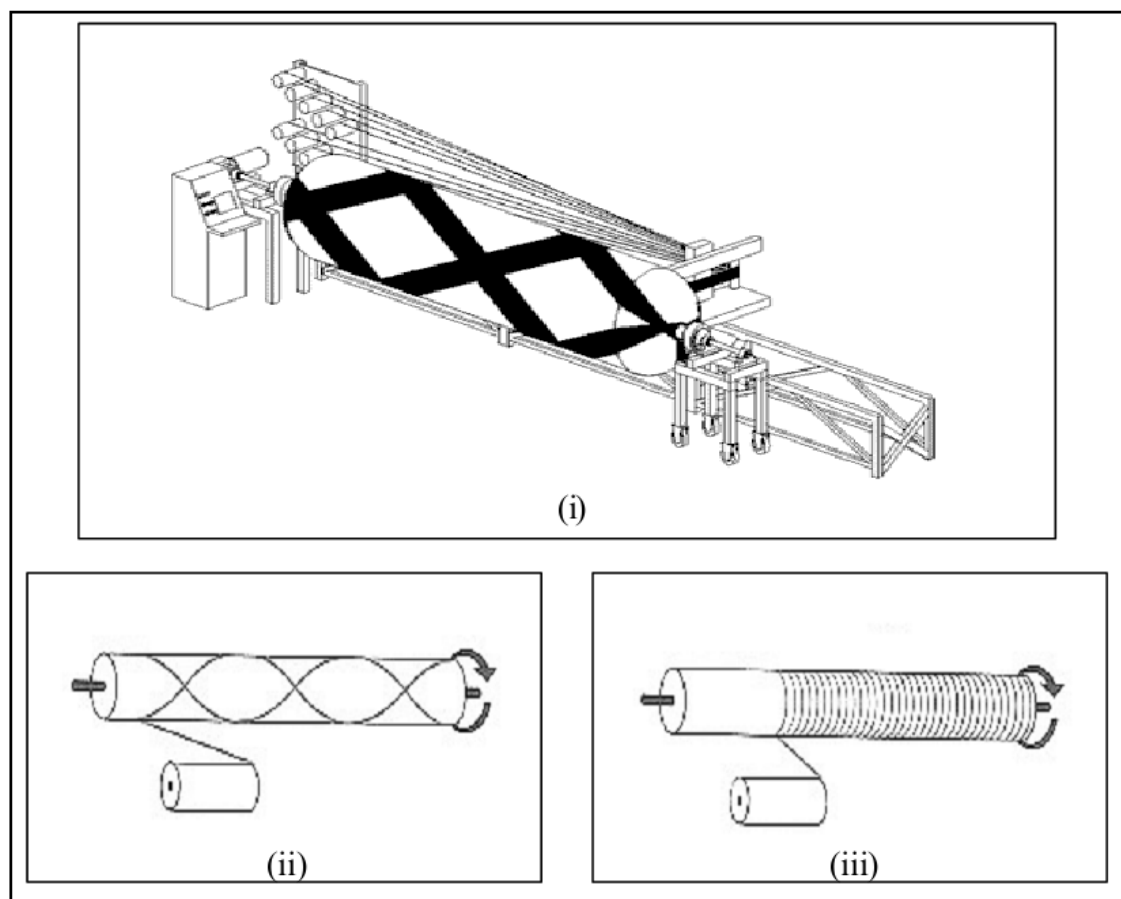


Figura 7 - (i) Máquina de enrolamento filamental; (ii) Representação do enrolamento helicoidal; (iii) Representação do enrolamento polar [11].

Máquinas de "filament winding" são classificadas de acordo com a quantidade de graus de liberdade em que operam. O número mínimo de graus

de liberdade possível para realizar o processo é dois: o primeiro é a rotação do mandril e o segundo é o movimento horizontal do carretel. Outros graus de liberdade podem ser adicionados ao olhal por onde a fibra passa antes de ser enrolada no mandril. Até hoje, o maior número possível de eixos em uma máquina desse tipo é sete [4].

Além do padrão do enrolamento, a tensão de enrolamento também é um parâmetro crítico do processo. O aumento da tensão nas fibras aumenta a fração volumétrica do composto e reduz as tensões residuais. Uma tensão inadequada pode resultar em espaços vazios no produto final, o que por sua vez, provoca perdas nas propriedades mecânicas finais. Além disso, uma tensão inadequada reduz o atrito entre o mandril e a fibra, podendo provocar deslizamento da fibra [1].

O umedecimento da fibra é feito em um banho de resina. Partes não rotativas são usadas para guiar a fibra para dentro e para fora do banho, de forma a reduzir a quebra de fibra em superfícies rotativas. Quando se utilizam fibras pré-impregnadas, o umedecimento em resina não é necessário [12].

Enrolamento filamentar é um processo eficaz para produzir tubos de alta resistência de vários tamanhos, capazes de lidar com pressão interna elevada. A variação do ângulo de enrolamento permite obter diferentes características mecânicas nos produtos finais. Aplicações típicas desse processo incluem tubos, canos, vasos de pressão, motores de foguetes e reforço de colunas de concreto.

3. PROJETO

3.1. Requisitos de Projeto

Antes de se iniciar qualquer projeto de máquina, deve-se conhecer quais seus objetivos e suas restrições. Uma máquina usada para produção em escala certamente terá um layout diferente daquela usada para se atingir alta precisão, por exemplo.

O objetivo deste projeto é a construção de uma máquina CNC de enrolamento filamentar com quatro graus de liberdade, o que possibilita a fabricação de uma maior variedade de peças se comparada com uma máquina de dois ou três graus de liberdade.

O mandril da máquina, de alumínio, deverá ter no máximo 500 mm de comprimento e 200 mm de diâmetro, podendo ou não ser oco.

O eixo de rotação do mandril deverá ter resolução de 0,01 grau, velocidade angular máxima de 100 rpm e tempo máximo de 0,5 segundos para atingir essa velocidade. Os eixos de translação deverão ter velocidade máxima de 0,25 m/s.

Pretende-se usar apenas uma bobina de fibra de vidro para a alimentação da máquina e a tensão no fio durante o processo deve ser de 1,5 kgf. A máquina deve, também, ter a capacidade de trabalhar com fibra de carbono.

Estão descritas a seguir, de forma resumida, as especificações do projeto:

- Mandril de no máximo 500 mm de comprimento, 200 mm de diâmetro e massa inferior a 43 kg.
- Utilização de apenas uma bobina de fibra de vidro ou carbono
- Deslocamento do mandril com resolução de 0,01° e velocidade de rotação máxima de 100 rpm.

- Tensão de 1,5 kgf no fio de fibra de vidro ou carbono.
- Carro com velocidade máxima de 0,25 m/s nas direções longitudinal e transversal.
- Utilização do sistema Linux CNC para o controle numérico da máquina.
- Acionamento através de servo-motores.
- Redução entre motor e mandril com redutor harmônico (harmonic drive).

3.2. Projeto Mecânico

3.2.1 Topologia da Máquina

A topologia da máquina é a disposição dos elementos mecânicos no espaço. Para se definir uma topologia adequada, levaram-se em conta os seguintes aspectos:

- Dificuldade de projeto: buscando um projeto que minimizasse a quantidade de peças e que utilizasse elementos mecânicos convencionais.
- Dificuldade de montagem: levando em conta os desalinhamentos e deformações a que cada topologia está sujeita durante a montagem.
- Operabilidade: de forma que o produto final ofereça segurança ao operador, seja ergonômico e apresente alta confiabilidade.

Foram desenhados diversos layouts, alguns com dificuldades construtivas elevadas, outros com custo elevado, e ainda outros que, segundo uma análise mais detalhada, apresentariam dificuldades para se alcançar uma montagem precisa. A fase de projeto envolveu um grande número de consultas ao professor orientador, seguidas de mudanças significativas no projeto. As figuras 8, 9 e 10 mostram algumas das montagens iniciais que foram desenhadas. Tais montagens foram obtidas através da observação de diversas máquinas de 'filament winding' comerciais.

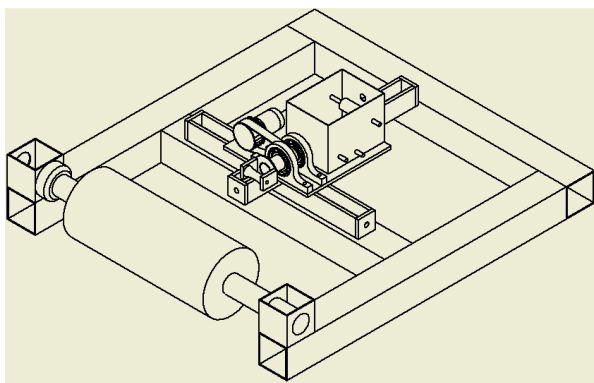


Figura 8 - Solução 1

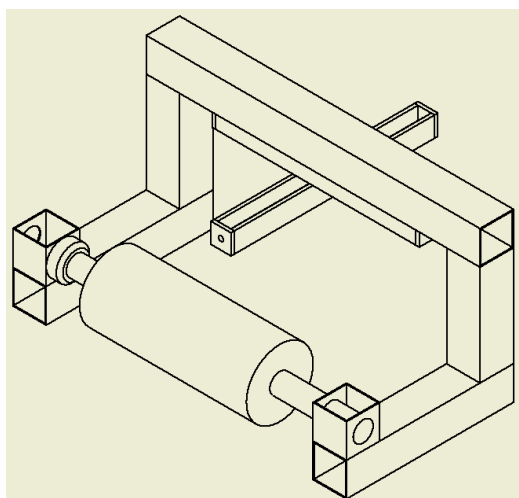


Figura 9 - Solução 2

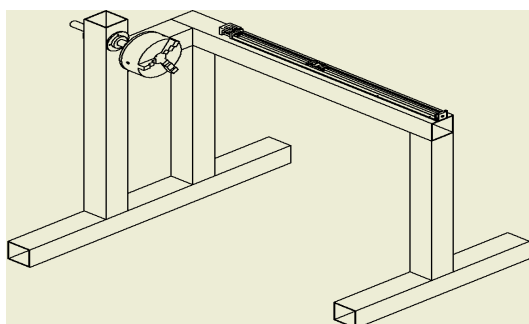


Figura 10 - Solução 3

A o 'layout' da figura 10 apresentou maior facilidade de construção e montagem, sendo o escolhido como referência para o projeto mecânico.

3.2.1.1. Primeiro Projeto

Com o 'layout' definido, um primeiro projeto foi proposto, como mostra a figura 11.

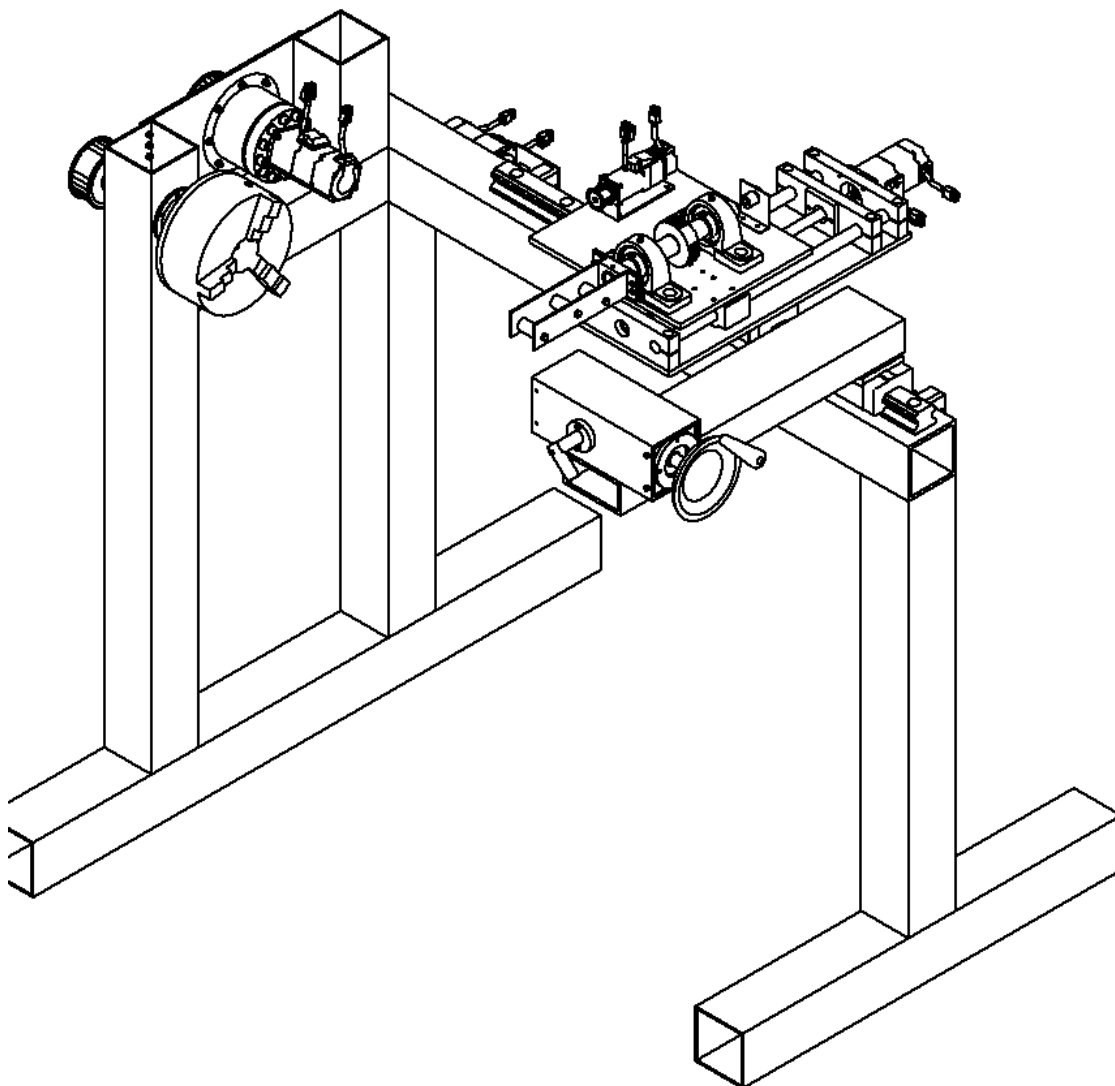


Figura 11 - Primeiro Projeto

Este projeto sofreu muitas modificações, como será possível perceber no tópico a seguir, mas foi fundamental para a obtenção de um projeto final otimizado. Entre as características desta proposta inicial, pode-se observar os seguintes detalhes:

- Para o acionamento do mandril, foi utilizado um servo-motor e um redutor harmônico, ligados por polias.
- Para a sustentação da outra extremidade do mandril, optou-se por uma contraponta.

3.2.1.2. Projeto Final

O projeto final contou com uma série de melhorias em relação ao anterior. A figura 12 mostra o 'layout' final da máquina.

Na figura 12 já é possível notar uma mudança nos pés da máquina: ao invés de perfis de aço horizontais, optou-se pela utilização de 'vibra-stop', um componente presente no mercado que auxilia na absorção de vibrações por parte da máquina. O 'vibra-stop' faz com que não seja necessária a fixação da máquina ao chão por meio de parafusos.

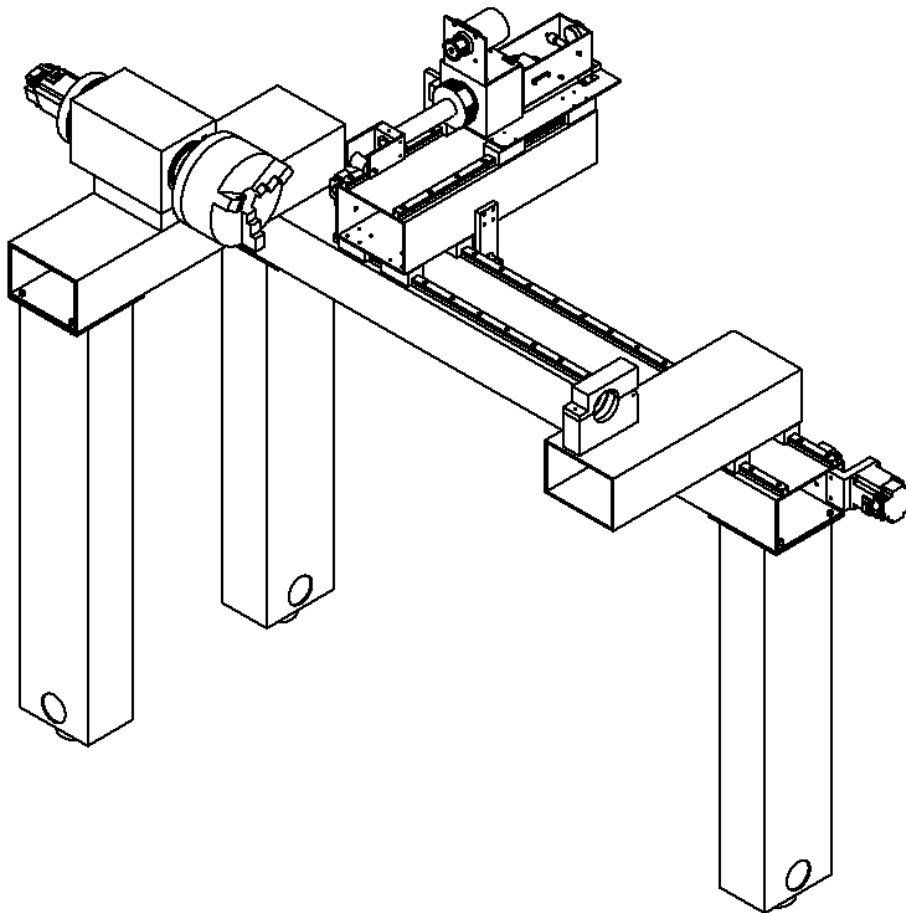


Figura 12 - Projeto Final

As principais características do projeto final estão listadas a seguir:

- Servo-motor acoplado co-axialmente à placa de três castanhas, utilizando como elemento de redução um redutor harmônico, como pode ser observado na Figura 13. Esta solução é melhor que a do projeto anterior porque, além de evitar a utilização de polias, a montagem do motor diretamente no redutor harmônico diminui drasticamente problemas provenientes de vibração. Adicionalmente, é possível ressaltar que, no projeto final, o sistema de acionamento independente da estrutura. Isso garante que os desalinhamentos da estrutura sejam isolados do sistema de acionamento.

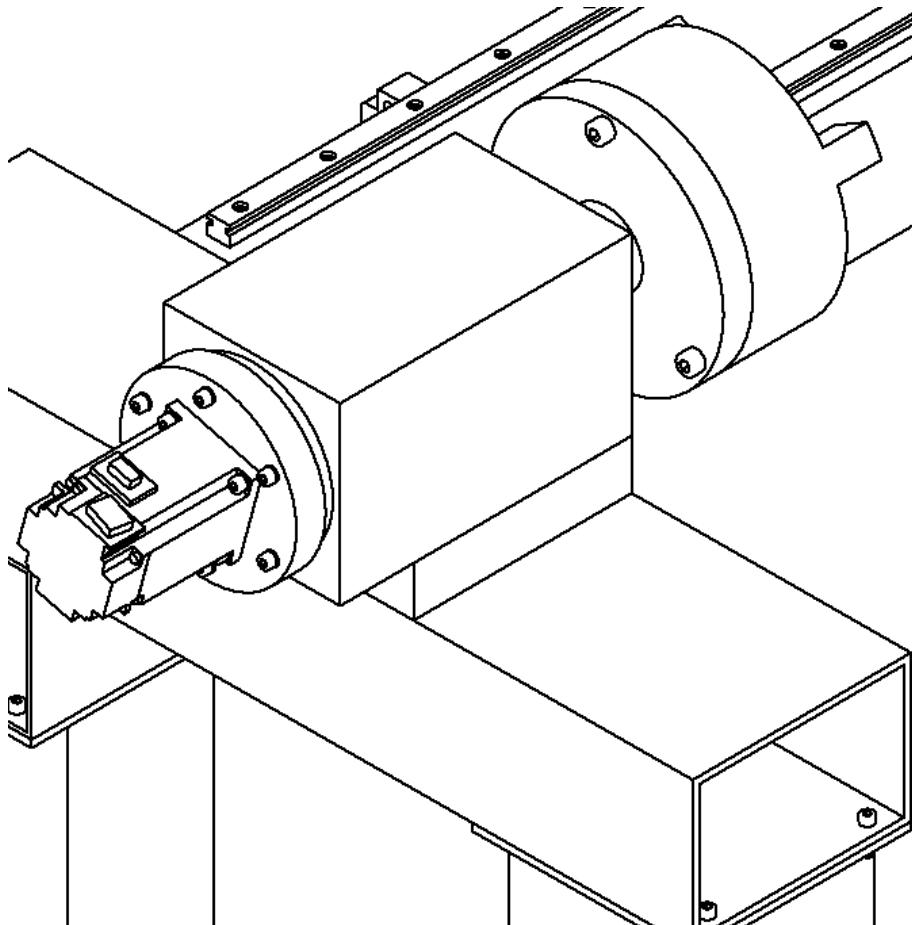


Figura 13 - Acionamento do Mandril no Projeto Final

- Novo controle de posição de fio, como pode ser visto na Figura 14. Aqui, é possível perceber que foram utilizadas apenas guias lineares (ao invés de rolamentos lineares) porque, desta maneira, a saída do fio fica mais baixa, ou seja, mais próxima do eixo do mandril. O motor que controla o

ângulo da fibra foi substituído por um motor de passo, devido à baixa exigência de velocidade e torque deste eixo, reduzindo a complexidade e o custo do sistema de acionamento. Nesta figura também é possível notar um sistema de impregnação de resina ao fio. Isso foi necessário devido à dificuldade em se obter fibra pré-impregnada.

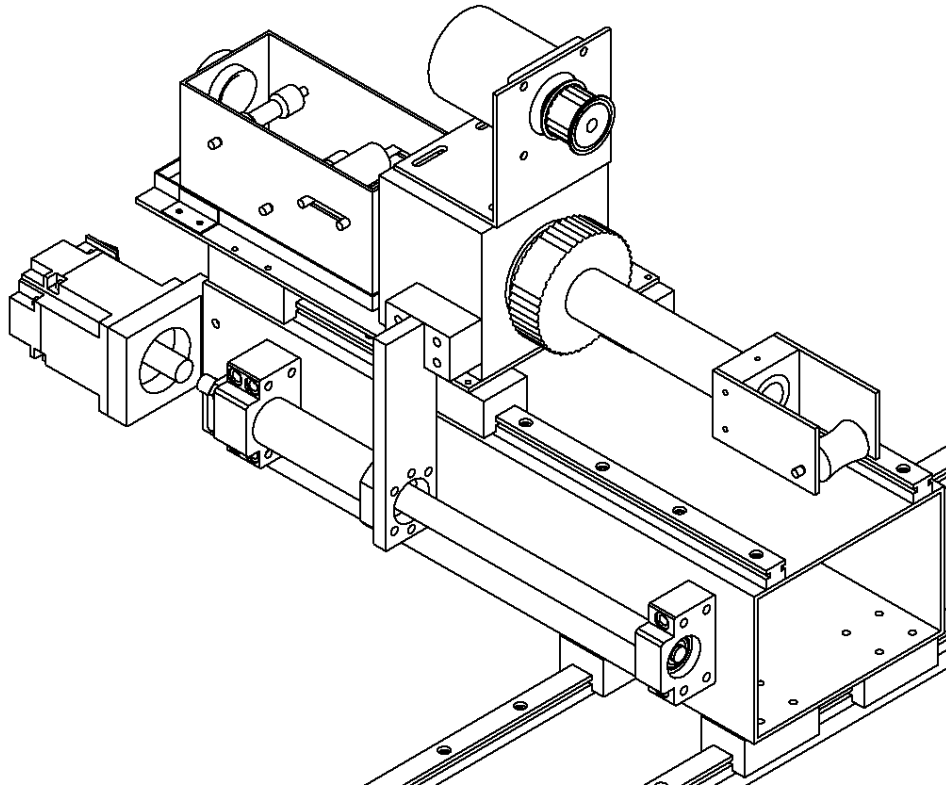


Figura 14 - Controle de Posição do Fio no Projeto Final

- Utilização de um carro de apoio do mandril, como pode ser visto na Figura 15. A opção por um mancal bipartido se deveu à facilidade de fabricação comparada à fabricação do carro da contraponta.

Os desenhos de fabricação e de conjunto se encontram no apêndice C desta trabalho.

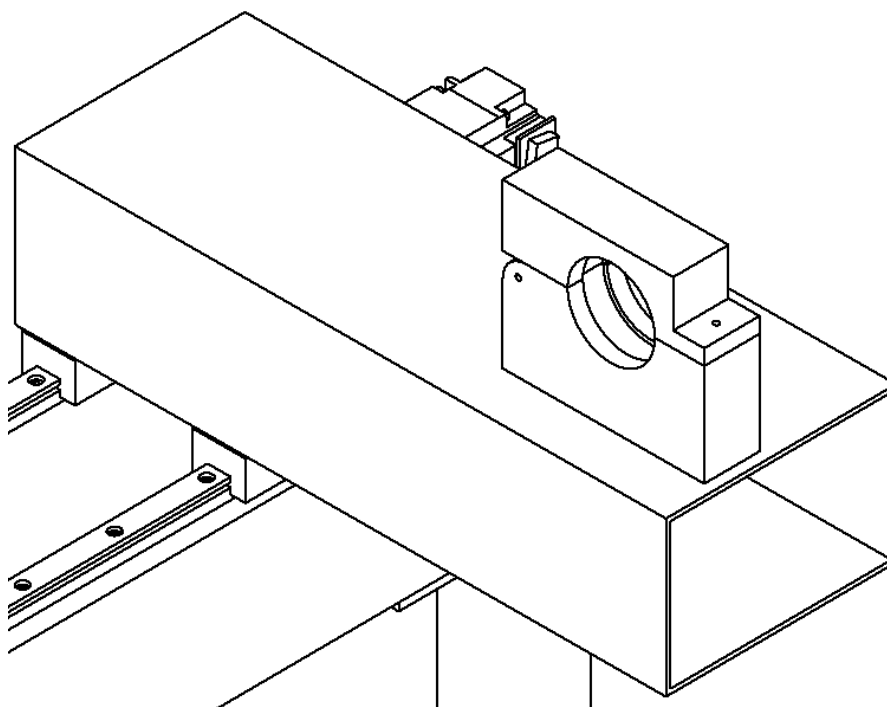


Figura 15- Sistema de apoio do mandril

3.2.2 Estudo de Viabilidade do Projeto

Devido à ordem de grandeza das cargas movidas por essa máquina, faz-se necessário o uso de servo-motores (com exceção do eixo de rotação da fibra, que utilizará um motor de passo). Uma das vantagens de se utilizar servo motores é a possibilidade de utilização de servo-drivers, do mesmo fabricante dos motores, que podem operar por meio de diferentes interfaces de comunicação. Além disso, os servo-drivers possibilitam um controle de posição em malha fechada, o que permite variações significativas de carga sem que haja perda de precisão dos movimentos.

A utilização de um redutor harmônico no acoplamento entre motor e eixo do mandril é justificada pela precisão necessária na movimentação do mandril, visto que redutores harmônicos são indicados para projetos em que são exigidos: altas razões de redução, alta rigidez e pouca folga entre os componentes.

3.2.2.1 Dimensionamento dos Motores

A carga movida no eixo do mandril é composta prioritariamente por:

- Um mandril cilíndrico de alumínio com as seguintes dimensões máximas: $\varnothing=200$ mm e $L=500$ mm
- Uma placa de três castanhas com diâmetro de 160 mm
- O eixo árvore da máquina
- Eixo do rotor do motor, cujo valor do momento de inércia foi extraído do catálogo do fabricante (Mitsubishi).

A

Figura 16 apresenta um esboço da montagem dos componentes descritos acima.

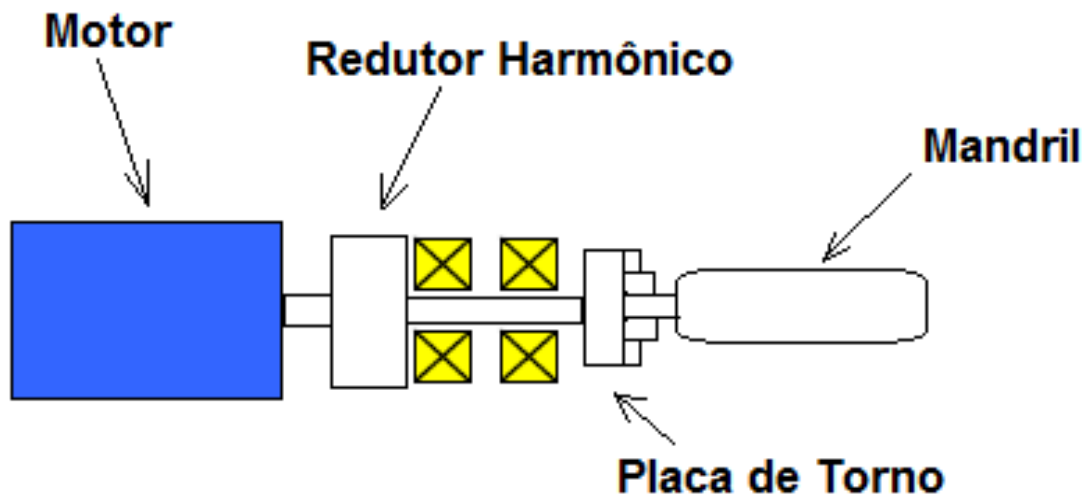


Figura 16 - Esquema de montagem para movimentação do eixo árvore

A tabela 2 mostra as massas e momentos de inércia aproximados para cada um dos componentes citados. Foram considerados, para tais estimativas, os valores de densidade do alumínio e do aço iguais a 2,7 e 7,8 kg/m³, respectivamente.

Tabela 2: Cargas movidas pelo eixo árvore

Componente	M (kg)	I (kg.m ²)
Mandril	42,5	0,22
Placa de Torno	20	0,1
Eixo árvore	6,61	2,98.10 ⁻³
Eixo do Rotor	-	2,8.10 ⁻⁵

Uma vez estimados os momentos de inércia dos componentes movidos, é necessário calcular uma aceleração para o conjunto. Considerando que o mandril deve partir do repouso e alcançar a velocidade de rotação máxima de *100 rpm* em *0,5s*, obtém-se uma aceleração angular na carga de *20,9 rad/s²*, o que corresponde a *1047,2 rad/s²* no eixo do motor (considerando a redução de 50 vezes).

Obtidos a aceleração angular e o momento de inércia do conjunto, é possível calcular o torque necessário no motor através da equação 3.1

$$T_{max} = \frac{\left[J_{rotor} + \frac{1}{n^2} (J_{eixo} + J_{placa} + J_{mandril}) \right] \alpha_{rotor} + \frac{1,5}{50}}{\eta} \quad (3.1)$$

O último termo do numerador dessa equação é devido à tração de 15N (1,5kgf) aplicada ao fio. Como o mandril pode ter até 0,1m de raio, tem-se um torque de 15.0,1/50 N.m, em que 50 é o valor da redução oferecida pelo harmonic drive. O denominador da equação 3.1 é o rendimento do conjunto.

Utilizando-se um rendimento de 80%, obtém-se um torque de 0,25N.m. Considerando uma rotação máxima do motor de 5000rpm, a potência máxima desse motor seria:

$$P = 0,25 \cdot \frac{5000 \cdot 2\pi}{60} = 130.9W$$

O motor selecionado para esse eixo de movimentação foi um Mitsubishi HF-KE43KW1-S100, com potência nominal de 400W e torque nominal de 1,3Nm. A escolha de um motor com capacidade superior à encontrada no dimensionamento traz possibilidade futura de adaptar a máquina a tarefas mais exigentes, e é justificada pela pequena diferença (aproximadamente 10%) entre os preços de um conjunto de acionamento de 200W e um de 400W.

A Figura 17 mostra uma guia acoplada a um motor. Dois eixos de movimentação da máquina são desse tipo.

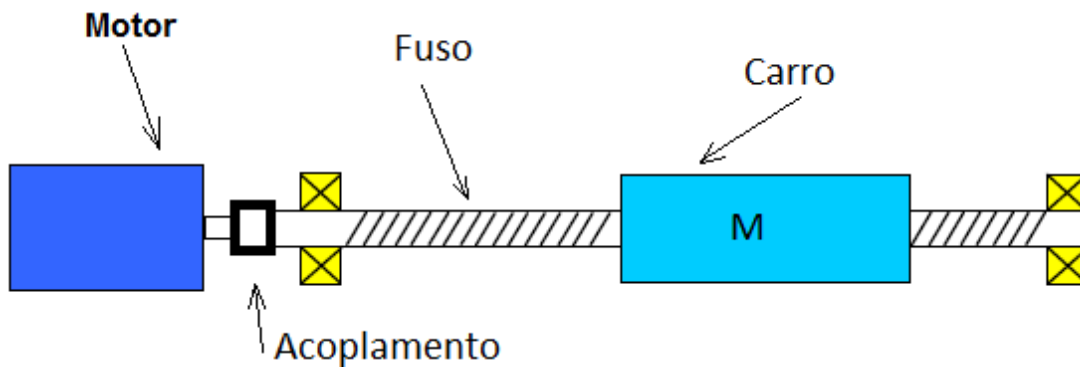


Figura 17 - Sistema de movimentação transversal e longitudinal

Para o eixo de movimentação no sentido longitudinal (em relação ao eixo do mandril), a carga movida pelo motor é composta basicamente por: Inércia do fuso de esferas recirculantes (J_f), inércia do rotor (J_r), tensão da fibra a ser enrolada (T_F) e massa do sistema de movimentação que é responsável por girar a fibra (M_{sm}).

O torque máximo exigido do motor é calculado pela seguinte relação:

$$T_{max} = \frac{\left[J_f + J_r + M_{sm} \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2 \right] \alpha + \frac{p}{2\pi} T_F}{\eta} \quad (3.2)$$

Nessa equação, α , p e η são respectivamente a aceleração angular máxima do eixo do motor, o passo do fuso de esferas e o rendimento do sistema. Ao se considerar que a velocidade máxima (de 0,25 m/s) deve ser

atingida em 0,1s, obtem-se uma aceleração máxima de $2,5\text{m/s}^2$ para o carro longitudinal, o que implica em uma aceleração angular máxima de $3141,6\text{ rad/s}^2$. Considerando um fuso de 16 mm de diâmetro com passo de 5 mm, e um rendimento de 80%, o torque máximo é da ordem de 0,4N.m, o que resulta em uma potência máxima da ordem de 125W, já que a velocidade nominal para o tipo de servo-motor adotado é 3000 RPM.

As acelerações no eixo radial devem ser semelhantes às exigidas no eixo longitudinal. Considerando que, devido à topologia da máquina, a carga movida pelos dois motores é quase a mesma, ambos os motores utilizados serão de 200W, e o modelo selecionado foi o Mitsubishi HF-KE23KW1-S100.

O eixo responsável pela rotação da fibra será movido por um motor de passo, já que a baixa exigência de torque e velocidade deste eixo não justifica os gastos com um sistema servo-motor/servo-drive. A relação entre o torque máximo exigido do motor e as características do sistema está representada na equação 3.3:

$$T_{max} = \left[J_{rot} + J_{pol1} + \frac{1}{n^2} J_C \right] \alpha \quad (3.3)$$

Nessa equação, J_{rot} , J_{pol1} , n , J_C e α são respectivamente o momento de inércia do rotor do motor, da polia acoplada a ele, a razão de redução devido às polias sincronizadoras, o momento e inércia da carga, que é o aparato de movimentação da fibra (e inclui a inércia da segunda polia) , e a aceleração angular do motor.

A fim de estimar adequadamente um valor para a aceleração angular do motor, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra uma relação aceitável para a posição angular do sistema mecânico que gira a fibra em função do tempo.

Considerando que essa curva seja a junção de duas parábolas, conclui-se que a aceleração angular do sistema seja aproximadamente $50,3\text{ rad/s}^2$. Como a razão de redução entre as polias é 2,4, a aceleração angular do motor deve ser aproximadamente $120,7\text{ rad/s}^2$, o que implica em um torque máximo

da ordem de 0,14N.m e velocidade angular máxima de 30,2 rad/s. É importante lembrar que esse cálculo é recursivo, pois a princípio, o momento de inércia do motor não é conhecido. O motor selecionado foi um HT23-394.

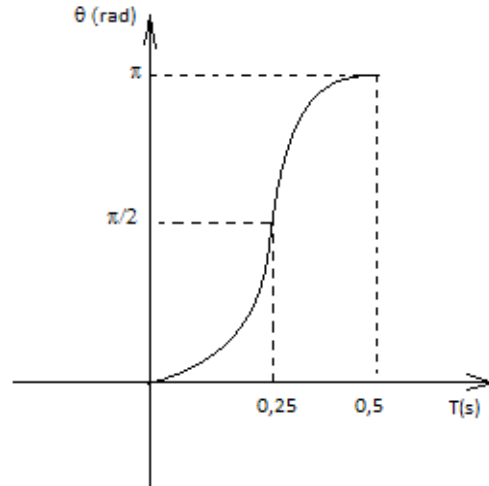


Figura 18 - Estimativa da posição angular do sistema que gira a fibra

3.2.2.2 Eixo árvore

Considerando que 0,5 segundo seja um período de tempo aceitável para que o eixo do mandril alcance sua velocidade máxima de rotação (de 100 rpm) e conhecendo-se os momentos de inércia da placa de três castanhas e do mandril utilizados, calcula-se o torque máximo a que o eixo estará submetido. Uma vez calculado o torque, deve-se dimensionar o eixo para que a deformação por torção seja inferior à resolução desejada e para que a tensão de cisalhamento seja inferior à máxima tensão de cisalhamento do material do eixo. Esses cálculos podem ser realizados por meio das equações 3.4 e 3.5.

$$\tau_{Max} = \frac{T \cdot r}{J} = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (3.4)$$

$$\phi = \frac{TL}{JG} \quad (3.5)$$

Nessas equações, τ é a tensão de cisalhamento em um eixo cilíndrico maciço, T é o torque, r o raio da seção transversal do eixo, L o comprimento, J o momento de inércia polar, G o módulo de elasticidade transversal e ϕ a deformação angular sofrida.

O torque máximo calculado foi aproximadamente $5N.m$, e considerando que o material do eixo será aço 1045, de acordo com as equações 3.4 e 3.5, um diâmetro de 32 mm garante que os requisitos sejam satisfeitos. Usaremos um eixo com diâmetro mínimo de 50 mm, obtendo assim coeficientes de segurança maiores que 100 para a deformação e a tensão admissível no eixo.

3.2.2.3. Frequência natural associada a torções no sistema de acionamento do mandril.

Como o acionamento utiliza um redutor harmônico, e esse componente possui uma parte flexível, é importante garantirmos que a rigidez desse sistema seja suficientemente alta para que a máquina não sofra o problema de vibrações. A equação 3.6 é uma aproximação que permite estimar a frequência fundamental de um sistema sujeito a torção [13].

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{tor}}{J_{conj}}} \quad (3.6)$$

Nessa equação, K_{tor} é a rigidez torcional e J_{conj} é o momento de inércia polar do conjunto movido. A rigidez torcional do redutor harmônico utilizado, de acordo com o manual do fabricante, é $5,4.10^4$ N.m/rad. O momento de inércia do conjunto movido é aproximadamente $0,31kg.m^2$, e portanto, a frequência natural desse sistema é aproximadamente 60 Hz. Como esse valor é bastante superior às frequências associada aos movimentos da máquina, não há risco de a estrutura entrar em ressonância.

3.2.2.4. Frequências naturais de vibração da estrutura

Para calcular as frequências naturais da estrutura, utilizamos uma abordagem recorrente, proposta inicialmente por Rayleigh. Esta modelagem é robusta, pois leva em conta a massa distribuída ao longo dos elementos estruturais. Consideramos inicialmente que a estrutura é composta por perfis retangulares, bi-engastados e, por simplicidade, independentes. Calculamos então as frequências naturais de cada um desses perfis utilizando a equação

3.7, e consideramos a menor dessas frequências, já que se espera que a máquina seja rígida, ou seja, tenha frequências naturais altas.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{sec}}{m_{ef}}} \quad (3.7)$$

Nessa equação, deduzida na referência 19, K_{sec} é a rigidez do perfil, calculada como função das condições de contorno e da carga distribuída ao longo do perfil, e m_{ef} é a massa efetiva, também chamada de massa equivalente aglomerada. Para verificação de resultados, foi feita uma simulação que utiliza o método de elementos finitos. Essa simulação foi realizada em um módulo do software Autodesk Inventor.

O cálculo analítico forneceu como resultado uma frequência mínima de 48,46 Hz, considerando perfis com espessura de três milímetros e cujo material seja aço 1020.

3.2.2.5. Resistência na fixação do mancal do sistema de acionamento

Como momento da força peso do mandril e da placa de três castanhas está sendo suportado pelos parafusos que fixam o mancal na estrutura, deve-se garantir que não haverá rompimento nem deformação plástica nos parafusos nem no mancal.

O procedimento consiste basicamente em calcular o momento gerado pelo peso do mandril e da placa de três castanhas, calcular a força de tração a que os parafusos estarão sujeitos e a partir disso calcular o cisalhamento a que os dentes dos parafusos e das roscas no mancal estarão sujeitos. A partir disso pode-se determinar a classe e o diâmetro dos parafusos necessários.

A equação 3.8, relaciona a tensão de cisalhamento nos dentes de um parafuso de rosca métrica com diâmetro d , passo p e com n_f filetes sujeitos a uma carga P . [20]

$$\tau = P / \pi \cdot 0,64d \cdot p \cdot n_f \quad (3.8)$$

De acordo com os cálculos realizados, se quatro parafusos, espaçados da forma mostrada na Figura 19 suportarem a carga em questão, o mancal feito em alumínio e fixado com parafusos M10 classe 5,6 oferece fixação com coeficiente de segurança 2,6.

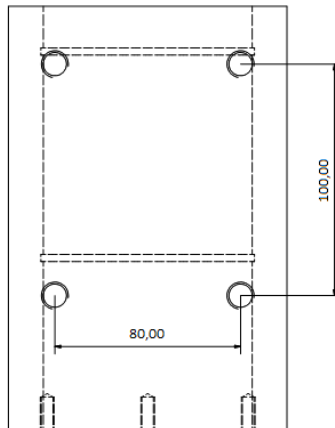


Figura 19 - Fixação do mancal do sistema de acionamento do mandril

3.2.2.6. Redutor Harmônico - Eixo árvore

Para o dimensionamento do redutor harmônico, seguiu-se as orientações presentes no catálogo do fabricante escolhido (HD System). Para isso, deve-se partir da análise do ciclo do trabalho da máquina, calcular os valores máximos e médios de velocidade de entrada e saída e o torque.

Foi estimado que o mandril devesse operar nas condições explicitadas nas figuras 20 e 21.

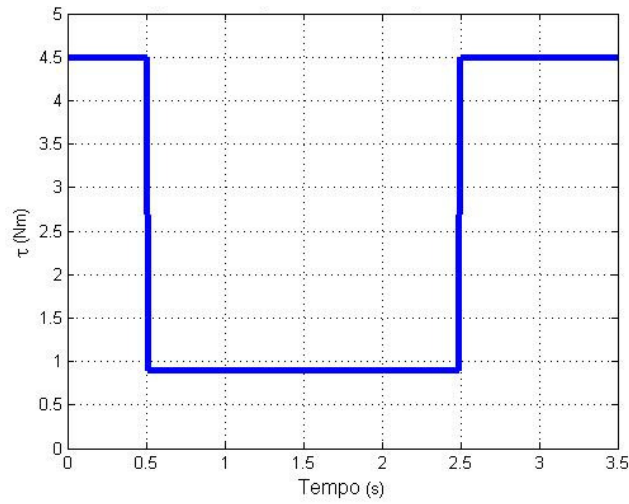


Figura 20 - Torque em função do tempo para um ciclo de trabalho

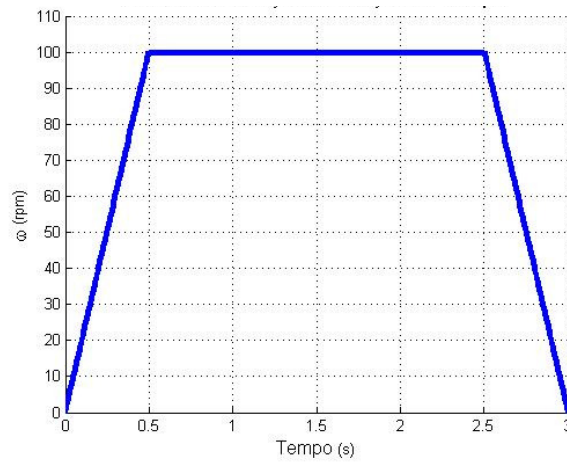


Figura 21 - Rotação em função do tempo

Em seguida, calculou-se o torque médio de operação. Para tal, utilizou-se a fórmula 3.9, presente em [18]:

$$T_m = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=0}^k n_i t_i |T_i|^3}{\sum_{i=0}^k n_i t_i}} \quad (3.9)$$

O valor calculado para o torque médio foi $T_m = 2,659 Nm$. A Figura 22 mostra o ciclo de trabalho incluindo o torque médio.

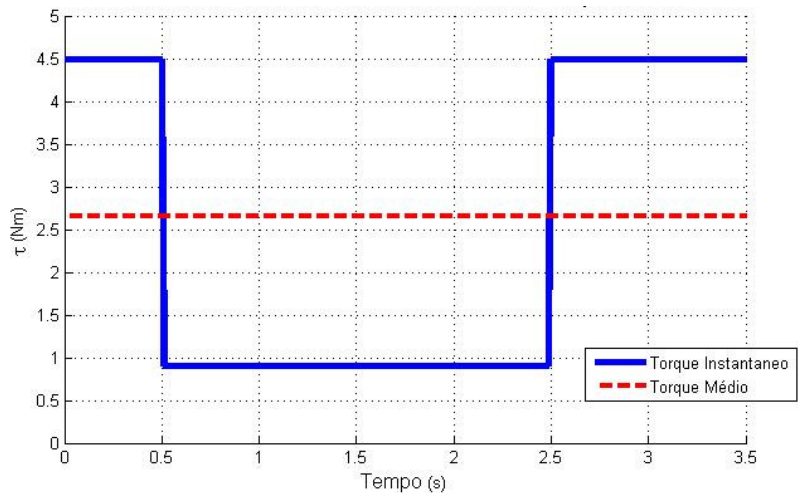


Figura 22 - Ciclo de trabalho incluindo o torque médio

Para prosseguir, deve-se estimar a velocidade média. Utilizando as informações da figura 22, a velocidade média é facilmente calculada e vale $V_m = 83,33 \text{ rpm}$.

Considerando os valores calculados acima, é possível obter a velocidade média do motor, também chamada de velocidade média de entrada. Considerando uma redução de 1:50, a velocidade média de entrada é calculada segundo a equação 3.6.

$$V_{ent} = 50 \times V_m = 4177,5 \text{ RPM} \quad (3.10)$$

Essas informações são suficientes para a seleção do redutor harmônico utilizado nesse projeto. Pelo catálogo consultado, todos os redutores das séries CSF ou CSG com numeração superior a 14 satisfazem os requisitos.

3.2.2.7. Obtenção das frequências naturais via software

Toda modelagem foi executada no software Autodesk Inventor 2011, versão estudantil, distribuída gratuitamente através do convênio USP. Uma análise pelo método de elementos finitos foi realizada utilizando-se o software Ansys, incorporado ao Inventor.

Foram obtidas as primeiras 8 frequências naturais da estrutura como um todo (que é o que nos interessa). Essas frequências devem ser maiores do

que as frequências de trabalho da máquina, de modo a evitar vibrações excessivas e perda da precisão e funcionalidade da máquina. A tabela 3 mostra as frequências naturais obtidas.

Tabela 3 - Frequências Naturais

Modo	Frequência
1	55,18Hz
2	61,82Hz
3	64,27Hz
4	106,74Hz
5	124,46Hz
6	132,22Hz
7	140,06Hz
8	169,21Hz

As figuras 23 a 30 mostram o modo de vibrar em cada uma das oito frequências naturais.

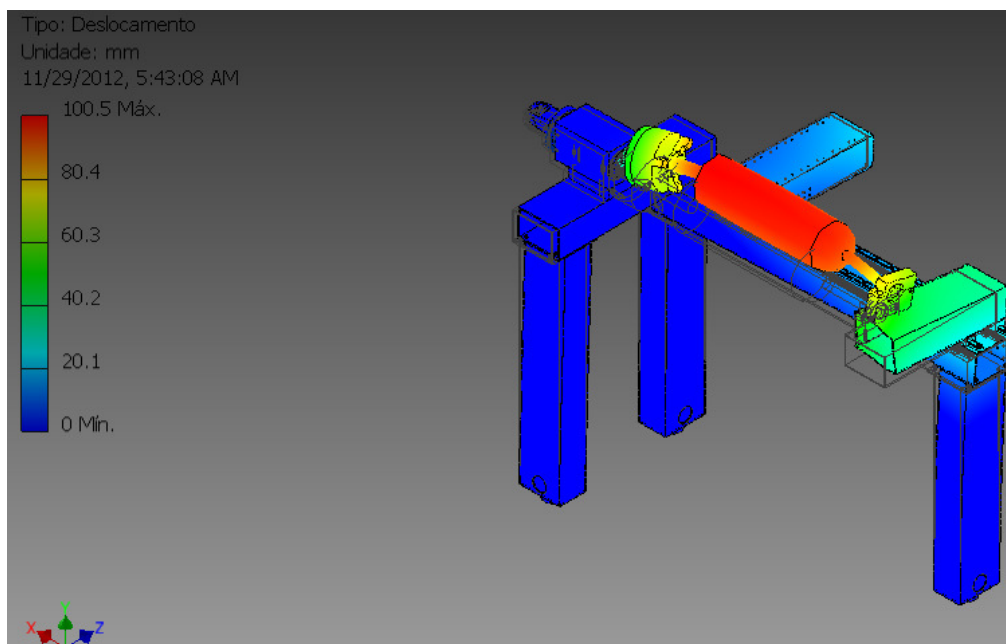


Figura 23 - 1º Modo de Vibrar

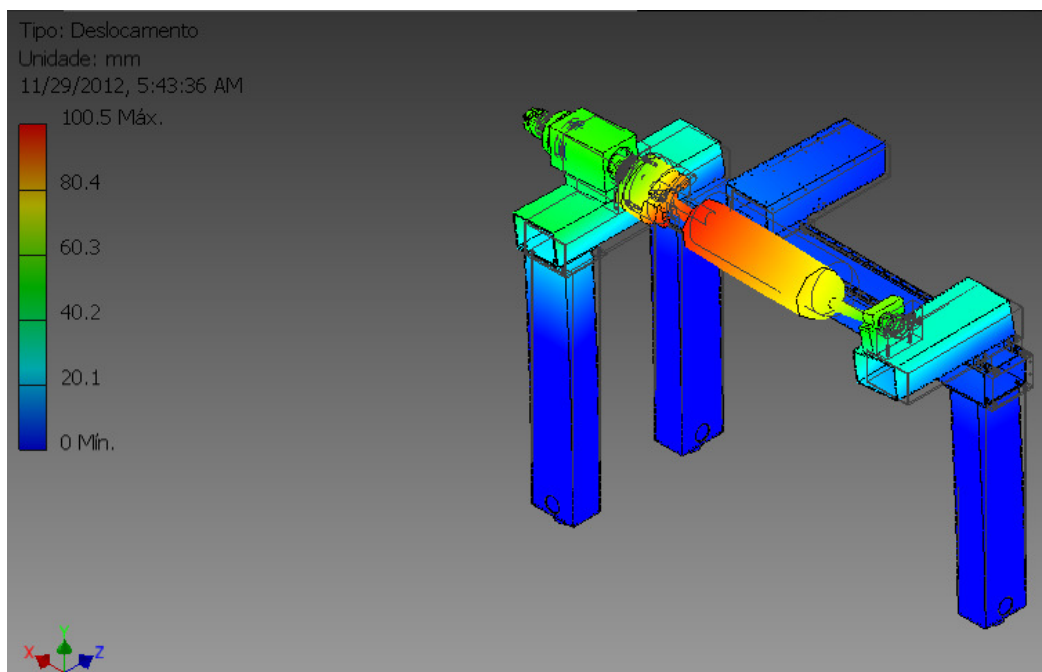


Figura 24 - 2º Modo de Vibrar

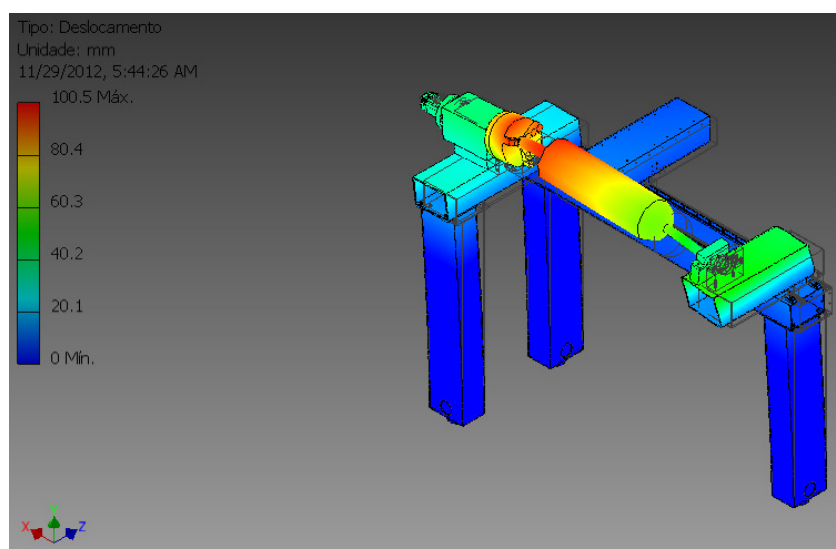


Figura 25 - 3º Modo de Vibrar

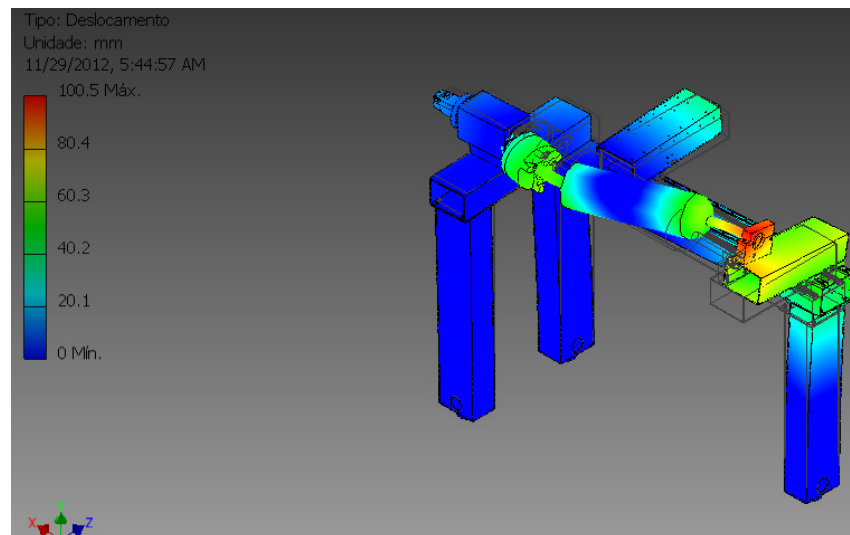


Figura 26 - 4º Modo de Vibrar

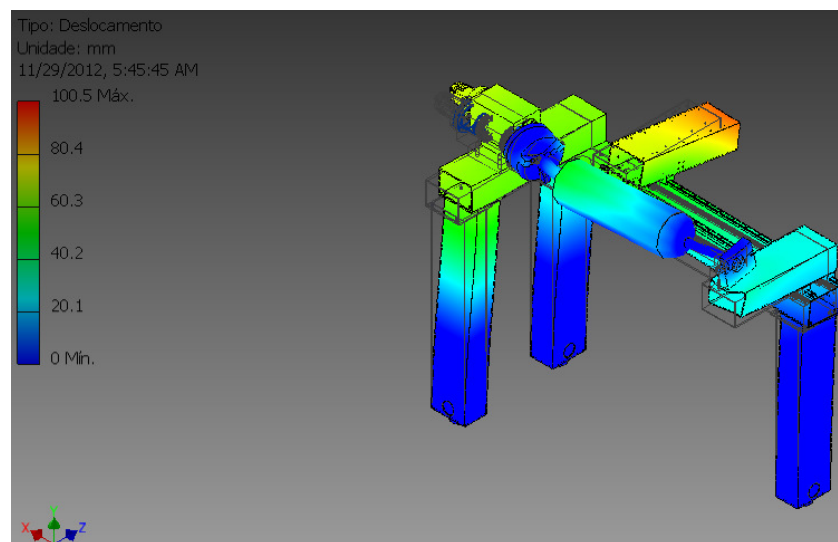


Figura 27 - 5º Modo de Vibrar

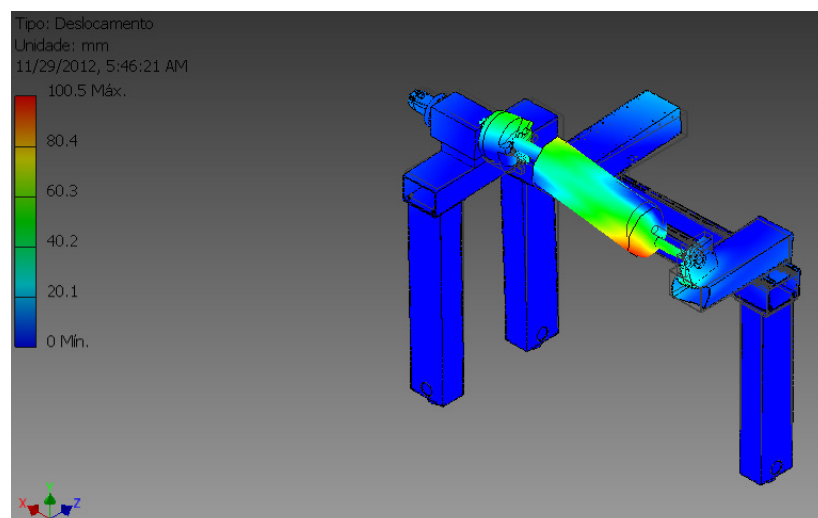


Figura 28 - 6º Modo de Vibrar

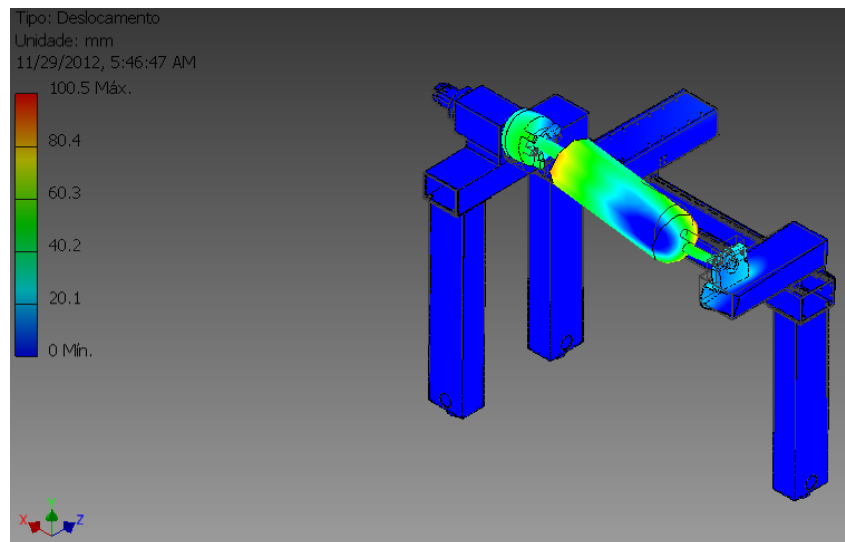


Figura 29 - 7º Modo de Vibrar

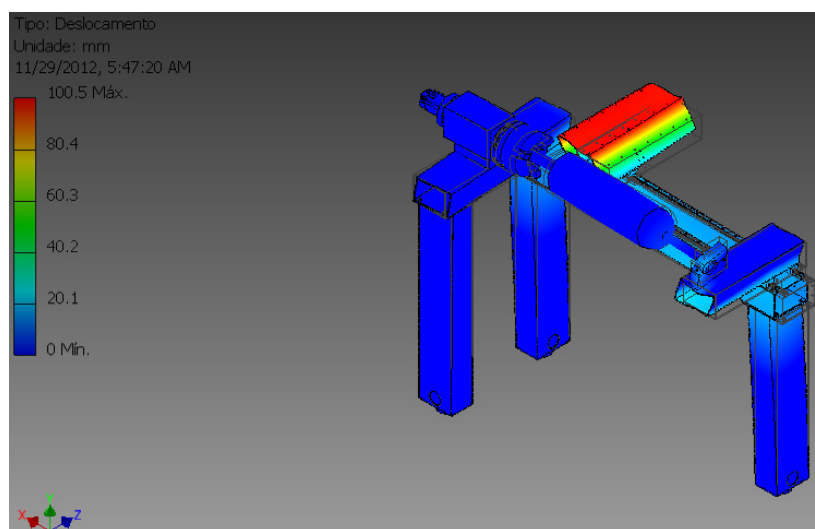


Figura 30 - 8º Modo de Vibrar

3.2.2.8. Análise estática via software

Pretendeu-se, com esta análise, visualizar a flecha e as tensões resultantes na máquina. Flechas grandes significam perda de precisão. Altas tensões podem levar a ruptura. As figuras 31 e 32 apresentam a tensão de Von Mises e a deformação da máquina.

Levando em consideração que a tensão de escoamento do aço 1020 é 360 MPa, não ocorrerão problemas de deformação, já que a tensão de Von Mises encontrada é bem inferior. O máximo deslocamento devido à deformação das guias é 0,01757 mm.

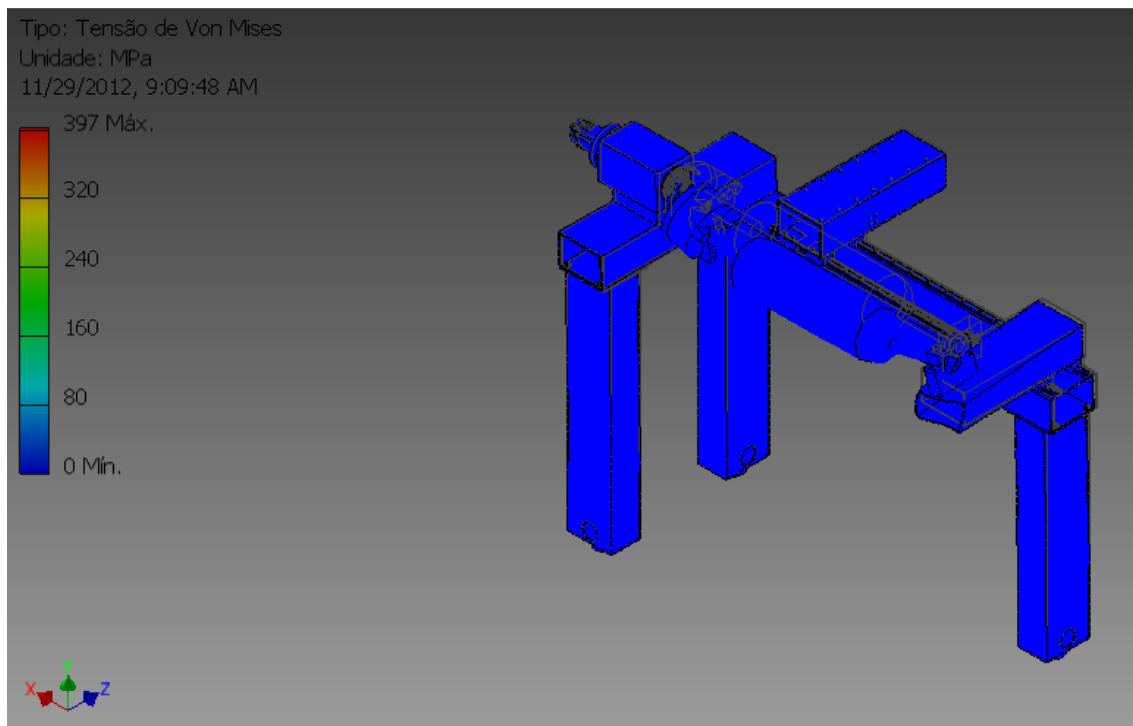


Figura 31 - Tensão de Von Mises

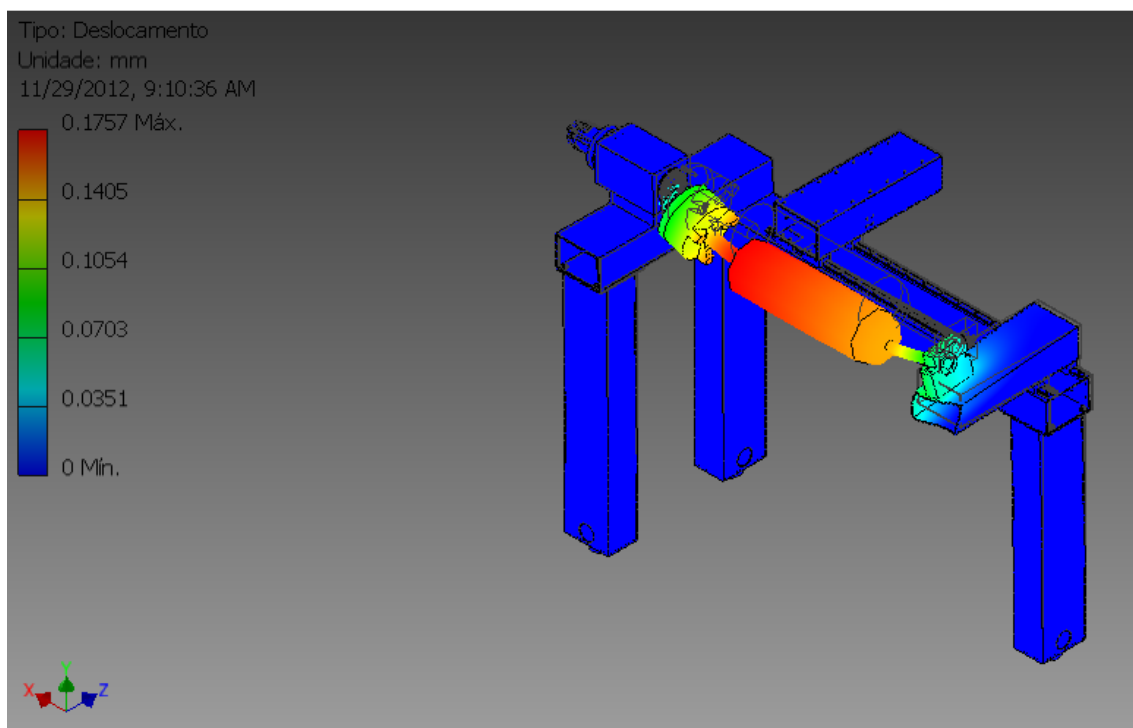


Figura 32 - Deformação

3.3. Projeto Elétrico

O projeto elétrico está representado de forma resumida na Figura 33, onde podem ser observados todos os subsistemas envolvidos no acionamento dos motores. Nessa figura, as ligações representam cabos com diferentes configurações, que serão detalhadas nesta seção, juntamente com os componentes mostrados na figura.

O acionamento dos motores ocorre da seguinte forma: um computador executando Linux CNC lê e interpreta um texto escrito em código G, no qual a movimentação prevista para a máquina está descrita. Graças a interpretação deste texto, sinais digitais são produzidos na porta paralela do computador, que está conectada aos servo-drivers. Os servo-drivers. Por sua vez, recebem esses sinais e os transformam em movimentação dos motores. Este sistema de movimentação dos servo-motores utilizados permitem que estes sejam tratados de forma muito semelhante a um motor de passo. Por essa razão, os sinais que são enviados pelo computador são pulsos que controlam as velocidades dos motores e sinais digitais que controlam a sua direção, além dos sinais de controle.

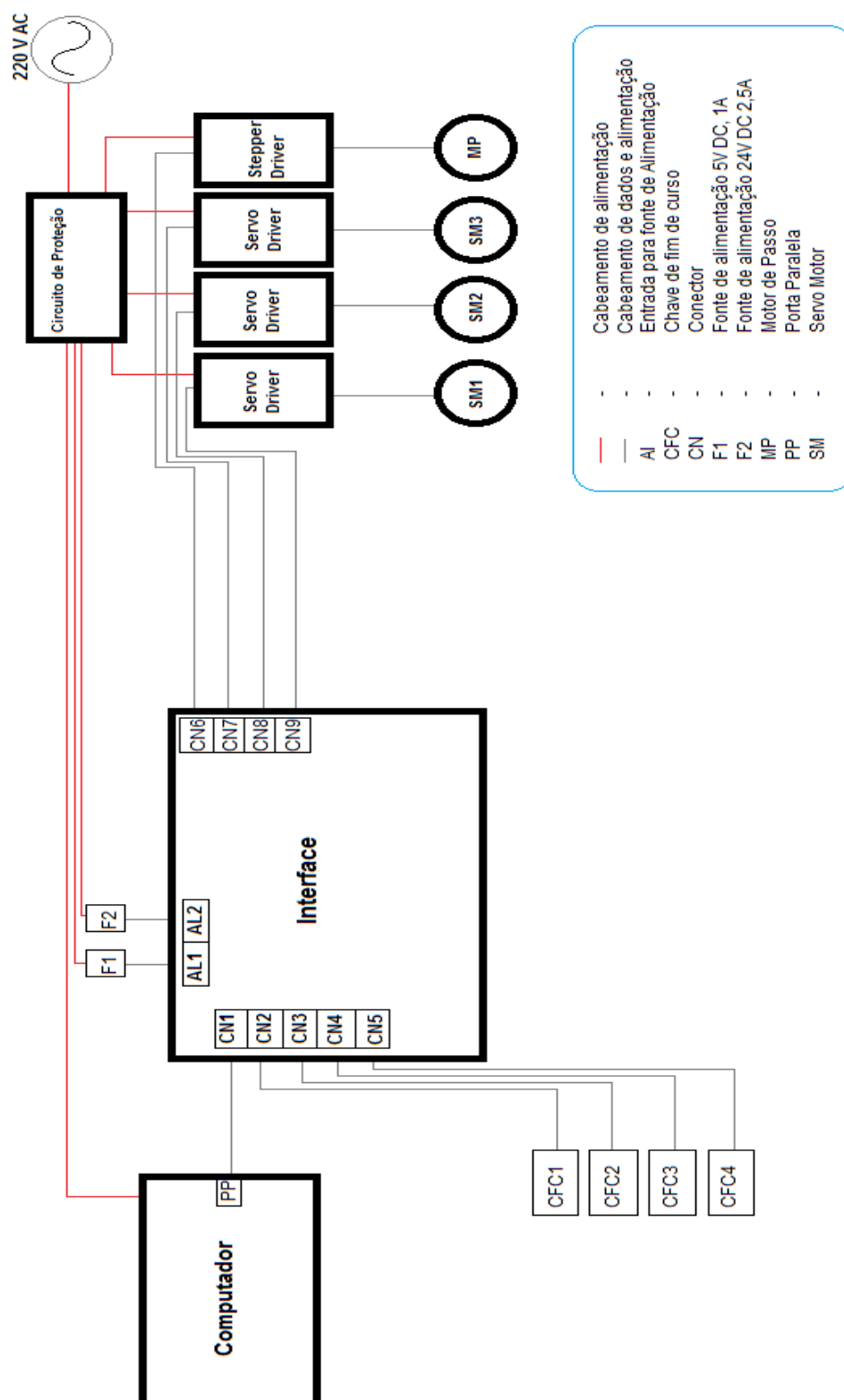


Figura 33 – Esquema Elétrico Geral

3.3.1 Sistema de Controle

O Linux CNC ou Enhanced Machine Controller (EMC2) é muito mais do que um simples interpretador CNC. É capaz de controlar máquinas ferramentas, robôs e outros dispositivos automatizados. Pode controlar servo motores, motores de passo, relês e outros componentes relacionados a máquinas ferramentas [14].

O EMC2 é composto por quatro principais componentes: Controlador de Movimentos (motion controller); Controlador Discreto de Entrada e Saída (I/O discrete controller); Executor de Tarefas (task executor); e um Conjunto de Interfaces Gráficas (graphical user interfaces). Além disso, há uma camada denominada Hardware Abstraction Layer (HAL), que permite que se configurem parâmetros para diferentes sistemas a serem controlados sem que haja necessidade de recompilar o programa [14].

O projeto elétrico da máquina desenvolvido nesse trabalho foi feito considerando que o controle será feito utilizando o Linux CNC, já que essa é uma ferramenta gratuita, e sua utilização pode poupar muito tempo de projeto de Software.

3.3.2 Computador

Foi utilizado um computador com processador Intel® Celeron® D 2,26 GHz, 1GB de memória RAM, e 120 GB de espaço total em Disco. O sistema operacional utilizado foi o Linux Ubuntu 10.2, em uma versão na qual já vem instalado o Linux CNC, e que pode ser obtida gratuitamente no site indicado na referência 14 deste trabalho.

O Linux CNC é capaz de controlar uma grande variedade de máquinas usando diferentes interfaces de hardware. Esse software possui um módulo chamado *stepconf*, que facilita a configuração de uma classe específica de máquinas: aquelas conectadas a um computador pessoal pela porta paralela e controladas por sinais de passo e direção. [15]

3.3.2.1. Requisitos de Hardware

Acionar motores através da geração de pulsos, em uma porta paralela, por um software é interessante porque, além de ter baixo custo, o hardware necessário para esta tarefa é amplamente utilizado. Entretanto, há algumas desvantagens:

- A frequência máxima com que os pulsos podem ser enviados é limitada, e dependente do computador utilizado.
- Pode haver instabilidade dos pulsos gerados.
- Sobrecarrega o processador. [15]

A frequência máxima com que um computador é capaz de gerar pulsos está associada à sua latência. Latência é o tempo que leva para o computador parar o que está fazendo e responder a uma requisição externa. Nesse caso, a requisição é o “*heartbeat*” periódico, que funciona como uma referência de tempo para a geração de pulsos. Quanto menor a latência, maior pode ser a frequência do “*heartbeat*” e, conseqüentemente, mais rápidos e com menos ruído serão os pulsos gerados. [15]

A latência é mais importante que a velocidade do processador e é determinada por um conjunto de fatores, tais como placa mãe, placa de vídeo, portas usb, etc. Um processador Pentium II que responda a interrupções em 10 microssegundos pode apresentar melhores resultados que um Pentium 4. Além disso, há diversas formas de reduzir a latência de um computador. Utilizar uma placa de vídeo *off-board* ao invés de uma on-board , por exemplo, pode melhorar consideravelmente a latência de um computador. [15]

Há uma ferramenta do Linux CNC chamada *EMC2 Hal Latency Test* que mede o tempo de latência do computador, e serve como um indicativo da capacidade de gerar pulsos do computador em questão.

3.3.2.2. Configuração dos pinos da porta paralela

As características da máquina que deveriam ser configuradas no painel do *stepconf* são:

- Dois eixos de movimentação linear;
- Dois eixos de movimentação rotativa;
- Quatro chaves de fim de curso;
- Parada eletrônica de emergência;
- Comando de ativação de drivers.

Entretanto, não existe uma pré-configuração para máquinas de dois eixos lineares e dois eixos rotativos no painel do *stepconf*. Uma alternativa é criar uma configuração para três eixos lineares e um eixo rotativo, e posteriormente, modificar o arquivo de extensão *.hal* gerado pelo *stepconf*.

Dessa forma, a configuração de pinos a ser feita no painel do *stepconf* é a mostrada na figura 34.

Outputs (PC to Mill):		Invert	Inputs (Mill to PC):		Invert
Pin 1:	ESTOP Out	☐	Pin 10:	Limit 1 + Home X	☐
Pin 2:	X Step	☐	Pin 11:	Limit 2 X	☐
Pin 3:	X Direction	☐	Pin 12:	Limit 1 + Home Y	☐
Pin 4:	Y Step	☐	Pin 13:	Limit 2 Y	☐
Pin 5:	Y Direction	☐	Pin 15:	Probe In	☐
Pin 6:	Z Step	☐	☐ Include custom PyVCP Panel		
Pin 7:	Z Direction	☐	☒ Include custom HAL configuration		
Pin 8:	A Step	☐	Output pinout presets:		
Pin 9:	A Direction	☐	Sherline Outputs		
Pin 14:	none	☐	Xylotex Outputs		
Pin 16:	none	☐			
Pin 17:	Amplifier Enable	☐			

Figura 34 - Configuração no painel do *stepconf*, ferramenta de configuração do Linux CNC

3.3.3. Circuito de Interface

Entre os tipos de servo-drivers disponíveis no mercado, há uma categoria acionada por pulsos elétricos. Esses sistemas, conforme mencionado acima, podem ser configurados para atuar de forma semelhante ao sistema de acionamento de um motor de passo, no qual são enviados pulsos que controlam a velocidade do motor e um sinal digital que controla o sentido de movimentação.

Foram utilizados os servo-drivers MR-E-20A-QW003 e MR-E-40A-QW003 da Mitsubishi, acionados por pulsos, que permitem duas modalidades de sinais de entrada: sinal proveniente de um circuito de coletor aberto e sinal diferencial. De acordo com o manual do próprio fabricante, referência 20 deste trabalho, o acionamento com sinal diferencial apresenta algumas vantagens: permite um cabeamento de maior comprimento e possibilita o acionamento com pulsos de frequência cinco vezes superior ao que seria possível com um circuito de coletor aberto. Por essa razão, essa foi a forma de acionamento escolhida.

Tendo isso em mente, a função da placa de interface – cujo projeto é parte integrante desse trabalho – é:

- Receber os sinais do computador;
- Alimentar e ler as chaves de fim de curso;
- Enviar os sinais das chaves de fim de curso para os servo-drivers e para o computador;
- Amplificar a corrente dos sinais recebidos – de forma a garantir que a corrente drenada do computador seja muito pequena (entre 0,02 mA e 0,2 mA, no caso do circuito projetado);
- Gerar um sinal diferencial que será transmitido para os servo-drivers;
- Ser uma interface que possibilite que os sinais de controle – tais como Eletronic Stop, e Drivers On/Off – enviados pelo computador possam ser convertidos e enviados para os drivers.
- Reduzir a quantidade de fios, simplificando as ligações necessárias para o funcionamento da máquina.

O apêndice A mostra o esquema elétrico dessa placa de interface. Para um completo entendimento do funcionamento desse circuito, aconselha-se a leitura do tópico três do manual dos servo-drivers, referência x desse trabalho, e do capítulo quatro do manual do usuário do Linux CNC, referência 15 desse trabalho.

3.3.4. Chaves de fim de curso

As chaves de fim de curso atuam como elementos de proteção dos sistemas elétrico e mecânico da máquina. Sua função é detectar quando o carro de movimentação se aproxima do fim de curso dos eixos de movimentação, evitando assim colisões causadas por erros de programação ou por distração do usuário durante a movimentação manual da máquina. Para esse projeto, a chave de fim de curso utilizada deve possuir pelo menos uma conexão NF (normalmente fechada) e ser capaz de suportar uma corrente de 10 mA operando a 5V DC.

Foram utilizadas quatro chaves de fim de curso, uma em cada extremidade dos eixos de movimentação linear. Os eixos rotativos dessa máquina não possuem fim de curso.

3.3.5. Circuito de proteção

A função do circuito de proteção é impedir que um ocasional curto circuito ou problema de natureza elétrica danifique os componentes, desligando a rede elétrica da máquina. A Figura 35 é uma sugestão do fabricante dos servo-drivers para a ligação do sistema de proteção.

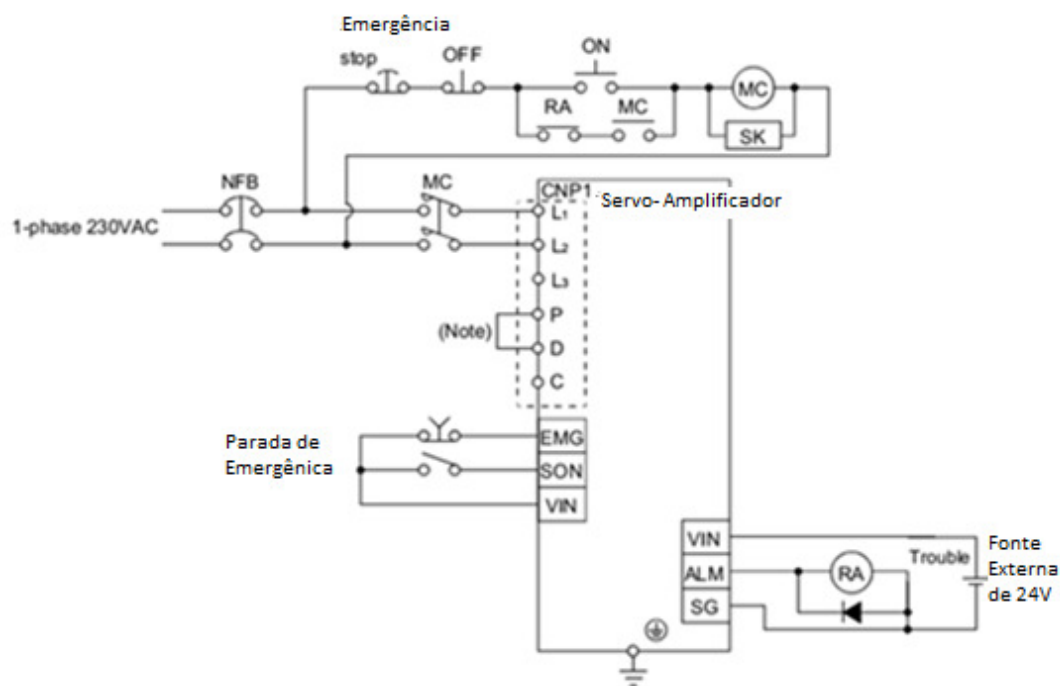


Figura 35 - Ligação dos servo-drivers à rede elétrica [adaptado de 21]

Nessa figura, NFB (acrônimo de No-Fuse Circuit-Breaker) representa o conjunto de disjuntores, que atuam desligando os servo-drivers em caso de sobrecorrentes. MC é o contator magnético, que quando ligado da forma mostrada na figura, faz com que os botões ON, OFF e Emergency stop atuem da forma esperada.

O elemento designado por RA representa um relé normalmente fechado, que atua no sistema de proteção da seguinte forma: O servo-driver possui uma saída designada por ALM (na figura), e cujo valor (0 ou 24 volts) está relacionado ao estado do sistema de alarme. O sistema de alarme responde a eventos de sobrecorrente, superaquecimento, entre outros, e está completamente descrito na seção 3.5 do manual do fabricante, referência x deste trabalho. Quando ocorre um problema e a saída de alarme é ativada, o relé é ligado, e abre o contato que está em série com o contator magnético. Isso faz com que o servo driver desligue, e só volte a ser ligado quando o botão ON for pressionado, e desde que o evento que causou o alarme tenha sido interrompido.

Como o circuito possui outros dispositivos eletrônicos além dos drivers, é necessário que o sistema de proteção seja dimensionado para proteger todos os elementos, a saber: as fontes de corrente contínua, designadas por F1 e F2 na Figura 33, o computador e os servo-drivers. A Figura 36 mostra o circuito de proteção com todos os componentes.

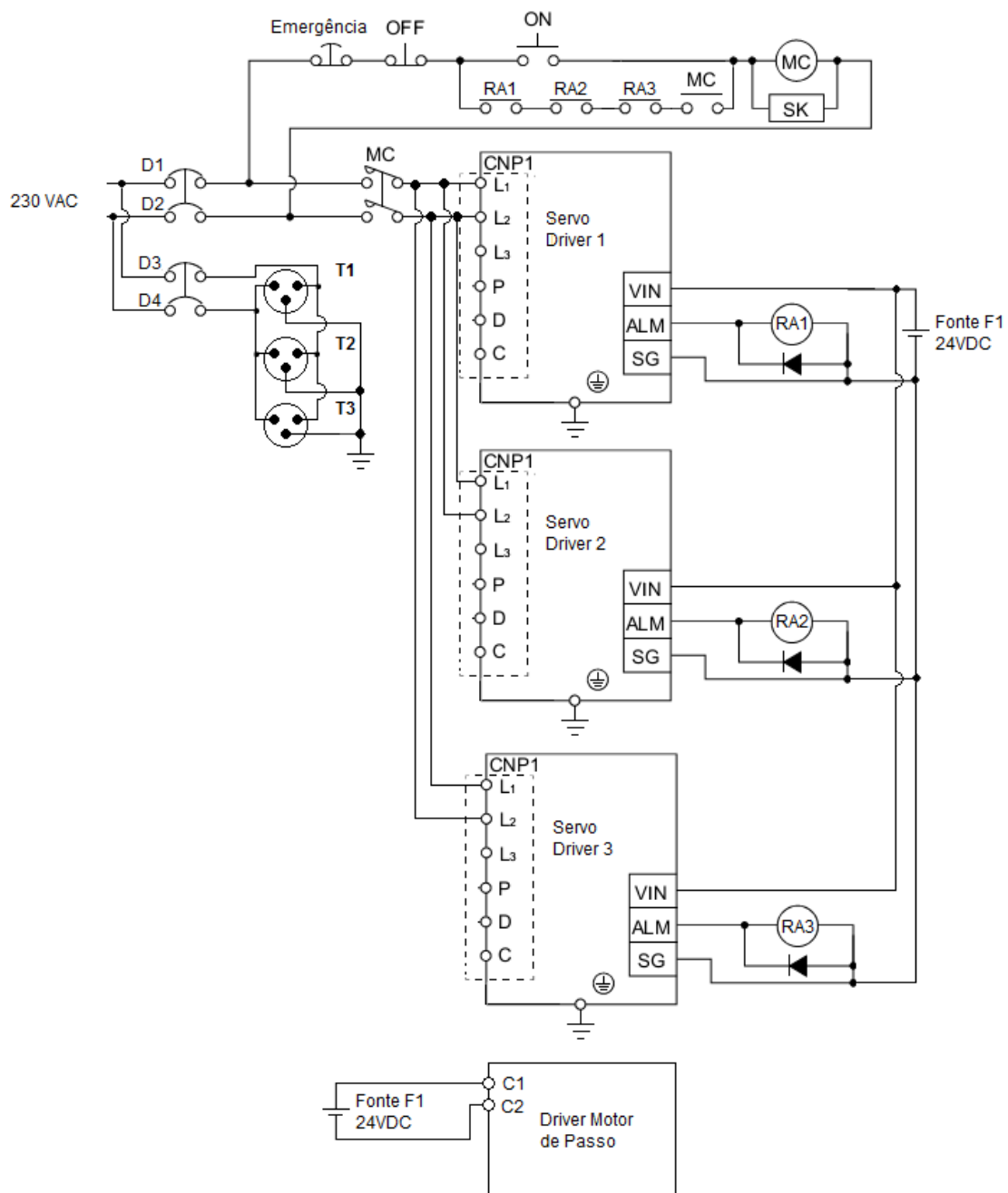


Figura 36 - Diagrama esquemático do Circuito de proteção

Nessa figura, os itens D1 e D2 são disjuntores de 20 Amperes, pois de acordo com o manual do fabricante dos servo-drivers, os drivers dos motores de 200W devem ser protegidos por disjuntores de 5 A, e os driver do motor de 400W por um disjuntor de 10A. Os disjuntores D3 e D4 são de 10A, e protegem os equipamentos conectados às tomadas T1, T2 e T3. Essas tomadas servem para alimentar o computador que controla a máquina, e as duas fontes de alimentação de corrente contínua, F1 (24VDC) e F2 (5VDC). O contator magnético é um Mitsubishi S(D)-N11, mas pode ser substituído por qualquer modelo que suporte a corrente exigida pelos servo-drivers. Foram utilizados relés Omron MY. Qualquer relé de contatos normalmente fechados que drene até 40 mA pode ser utilizado.

3.3.6 Conexões dos componentes

O cabo de conexão entre o computador e a placa de interface deve ser confeccionado. A Figura 37 mostra o projeto esquemático desse cabo.

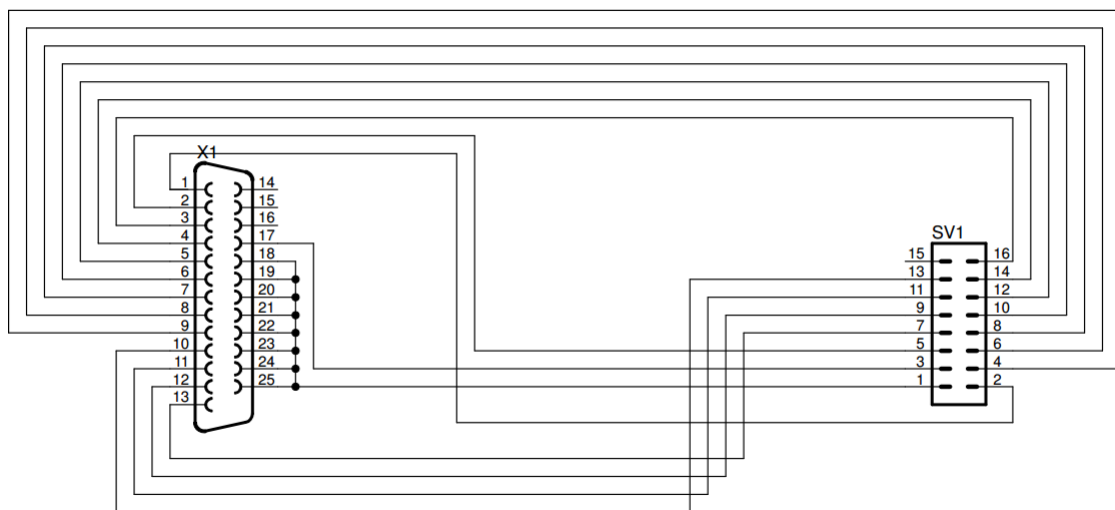


Figura 37 – Esquema de ligações do cabo PC/Placa de interface

Nesse esquema, o conector X1 é um DB25 (conector macho da porta paralela) e o conector SV1 é um conector de cabo flat de 16 vias.

A conexão entre o driver do motor de passo e a placa de interface é feita por meio de conectores parafusados. O esquema de ligação entre o driver e os demais componentes elétricos está mostrado detalhadamente na Figura 38.

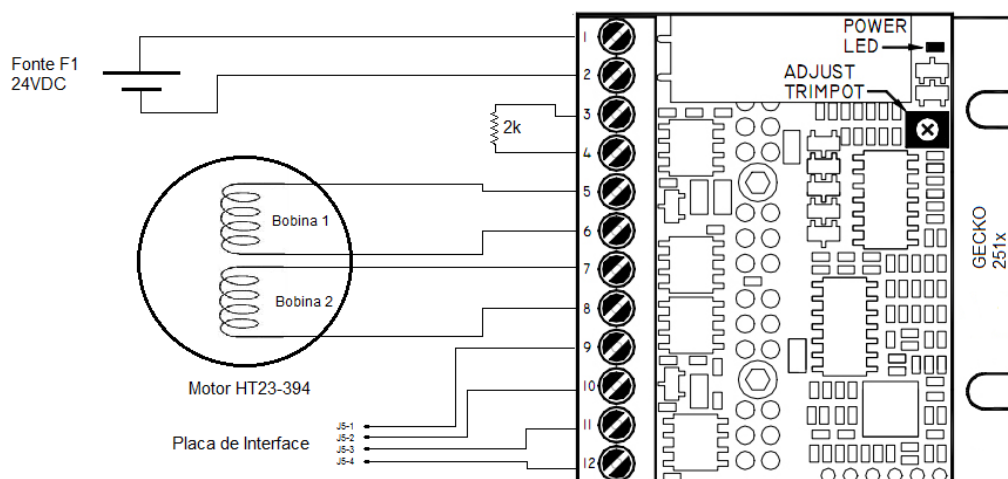


Figura 38 – Esquema de ligações para o driver do motor de passo

As conexões entre a placa de interface e os servo-drivers é feita por meio do cabo cujo esquema está mostrado na Figura 39.

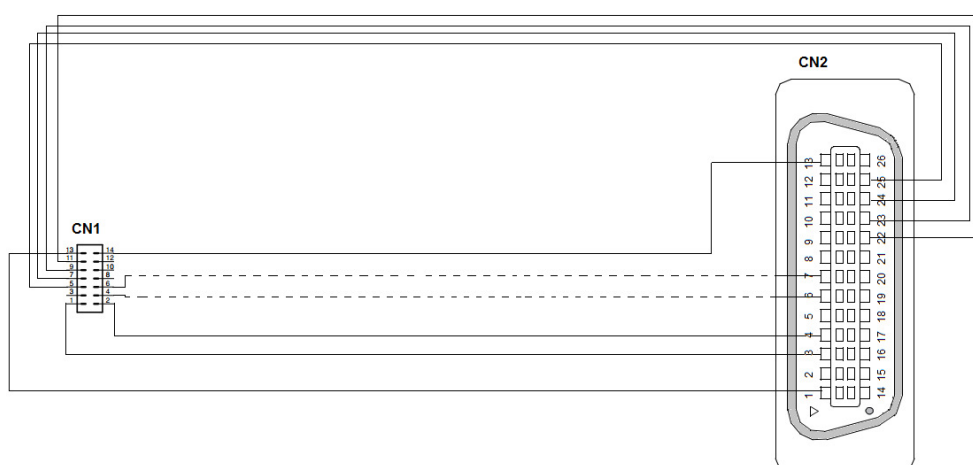


Figura 39 Cabo para conexão entre a placa de interface e os servo-drivers

Nesse esquema, CN1 é um conector para 'flat cable' de 14 vias, e CN2 é um conector 3M® 10126 -3000PE. As conexões tracejadas são referentes às chaves de fim de curso, e só existem para os servo-drivers modelo MR-E-20A-QW003, que controlam os motores de 200W.

As demais conexões elétricas são feitas por cabos comerciais. Há dois cabos que conectam os motores aos servo-drivers. Um que faz o acionamento e outro que serve para transmissão dos sinais dos encoders. Para os encoders

utilizou-se o modelo Mitsubishi MR-J3ENCBL5M-A2-H, e para transmissão de potência o modelo MR-PWS1CBL5M-A2-H. A lista completa de modelos de cabos disponíveis e as especificações dos mesmos podem ser encontradas no catálogo “MR-Family Servo Amplifiers and Motors” da Mitsubishi, referência 21 deste trabalho.

4. RESULTADOS

Após a compra de componentes mecânicos e elétricos, fabricação de peças de acordo com desenhos técnicos, implementação do esquema elétrico e montagem conforme o projeto previa, obteve-se a máquina mostrada nas figuras 40 a 45.

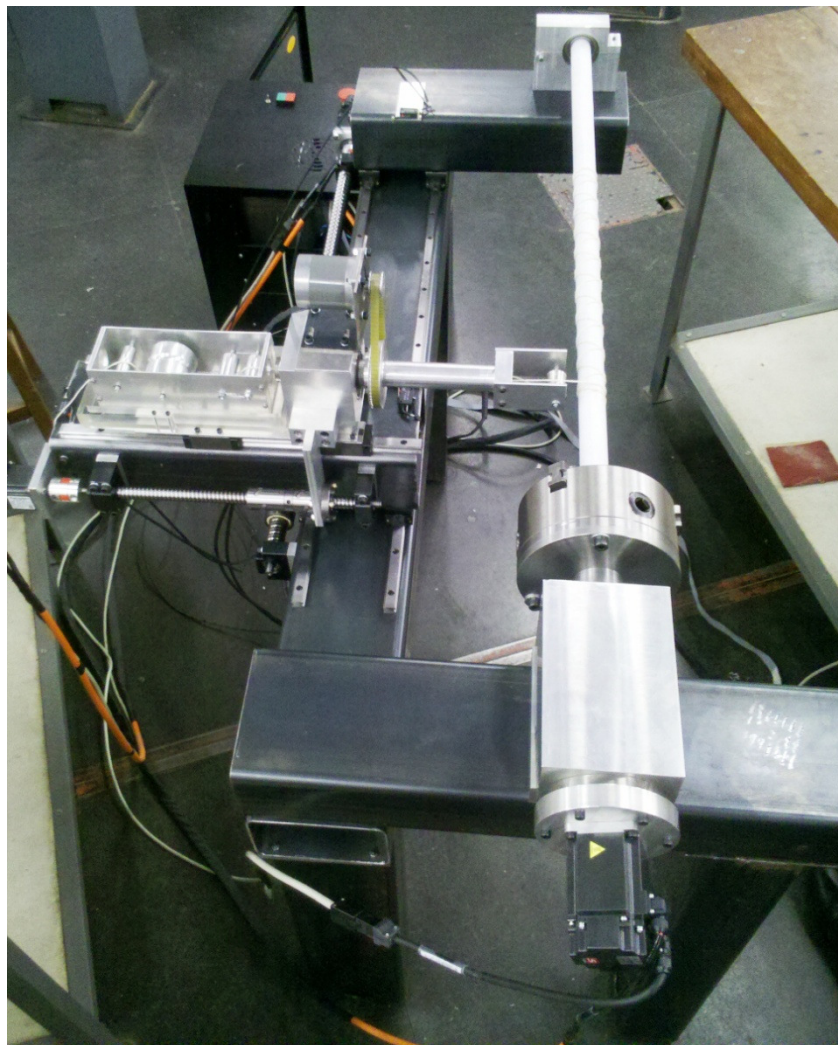


Figura 40 - Vista superior da máquina

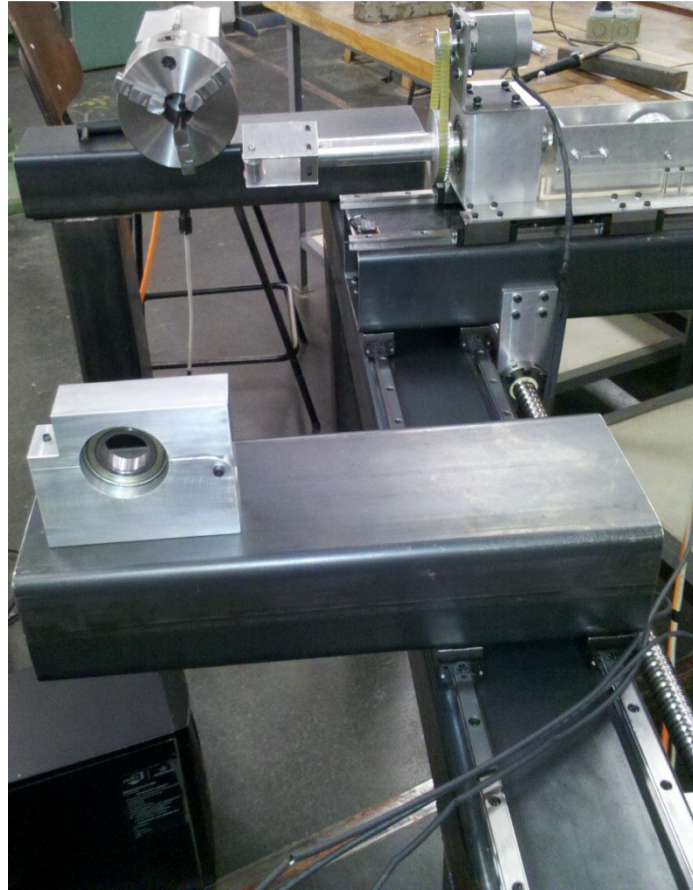


Figura 41 - Vista lateral da máquina

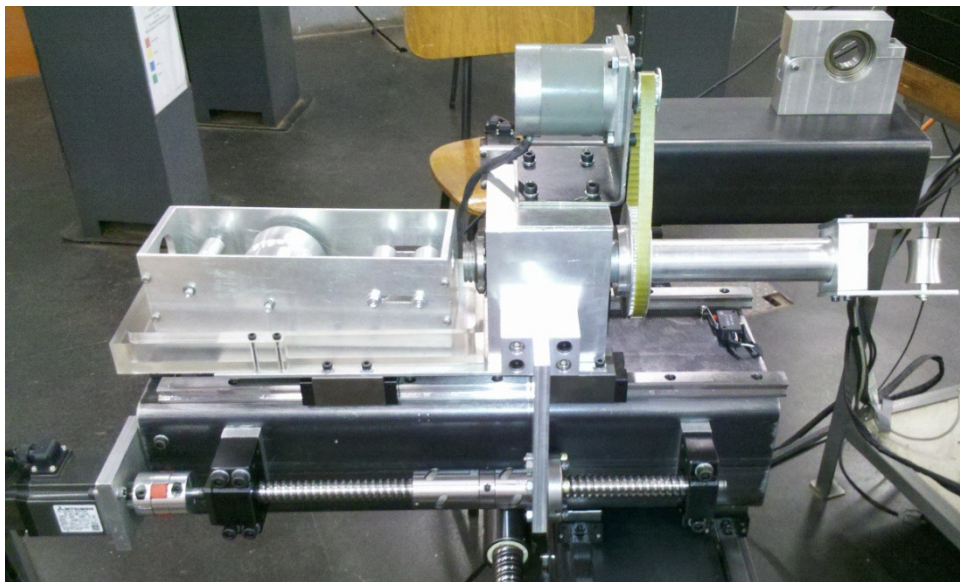


Figura 42 - Detalhe do banho de resina e do sistema de posicionamento da fibra

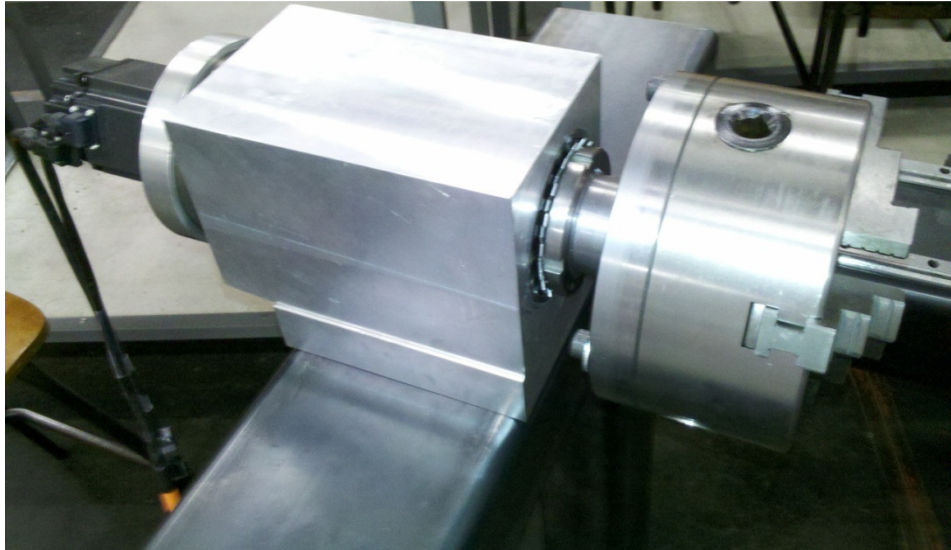


Figura 43 - Detalhe do sistema de acionamento do mandril

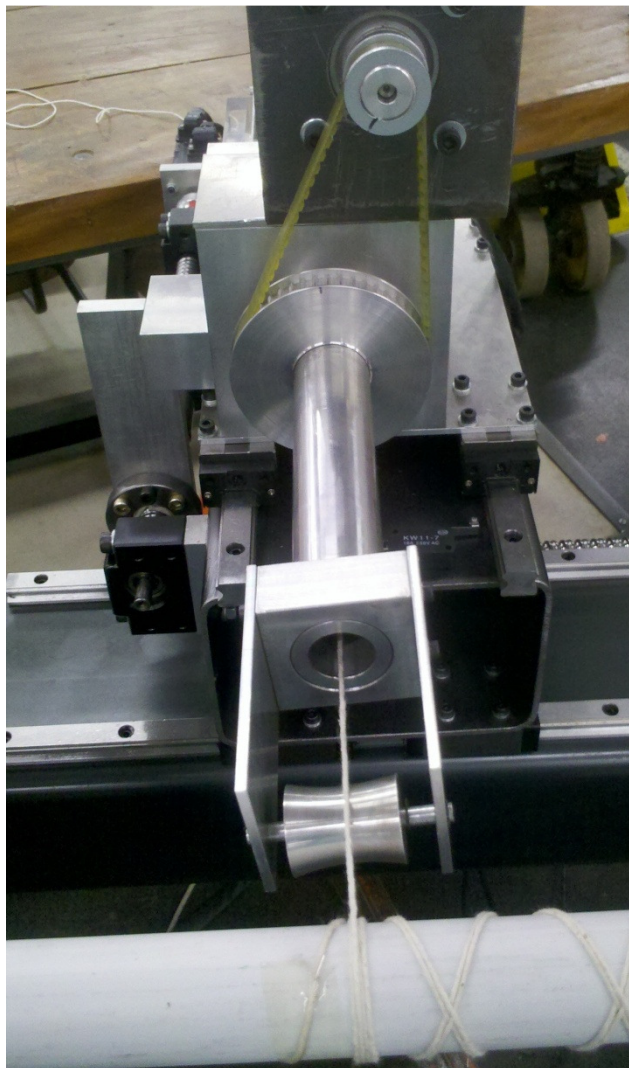


Figura 44 - Detalhe do sistema de posicionamento da fibra



Figura 45 - Gabinete que abriga o sistema elétrico

O cuidadoso processo de montagem, bem como a alta qualidade de usinagem das peças, foi fundamental para que se atingisse um resultado otimizado. Inspeccionando-se o alinhamento do mandril em relação ao deslocamento do eixo longitudinal (eixo 'y') através da utilização de um relógio comparador, por exemplo, o desvio obtido foi inferior a 0,1mm.

O acionamento da máquina através do Linux CNC ocorreu como esperado e o dimensionamento dos motores se mostrou eficiente. O Linux CNC permitiu o acionamento de cada eixo separadamente, possibilitando a alteração de velocidade e aceleração dos mesmos, bem como através da execução de código G. Foi possível, durante o processo de configuração, variar os valores das velocidades máximas e acelerações máximas nos eixos, de forma a encontrar os valores que mais se adequam à máquina.

Devido ao fato de o computador utilizado possuir um alto tempo de latência (termo explicado no item 3.3.2.1 desse trabalho), não foi possível

acionar os eixos em altas velocidades. Os testes foram feitos com velocidades inferiores a 100 mm/s. A utilização de um computador com configurações mais apropriadas certamente permitirá um acionamento com velocidades superiores.

Para os testes de enrolamento, utilizou-se uma barra de PVC como mandril e um fio de algodão, tensionado manualmente. Apesar da imprecisão associada a esses itens, foi possível simular o processo de enrolamento filamentar de forma satisfatória.

Não foi possível realizar a compra de um harmonic drive com redução de 50 vezes e, por causa disso, foi utilizado um de redução 200 vezes, presente no laboratório. Tal modificação resultou em uma velocidade máxima reduzida no eixo de acionamento do mandril, que não ultrapassa os 25 rpm.

Os servo-drivers se mostraram eficientes no acionamento dos motores, permitindo um controle preciso de posição, dissipando pouca energia (não sendo necessário um resfriamento forçado) e protegendo a integridade da máquina, já que os motores são desativados rapidamente quando da detecção de sobrecarga ou quando do acionamento de chave de fim de curso.

Um dos acoplamentos elásticos comprados para a utilização no servomotor de 200w apresentou um problema de usinagem, já que os furos para conexão dos eixos do motor e do fuso de esferas recirculantes estavam descentralizados. Tal acoplamento, portanto, deve ser substituído para o correto funcionamento da máquina.

O mancal bipartido se mostrou eficiente para uma fácil e rápida montagem ou desmontagem do mandril na máquina. A amplitude de deslocamento do carro responsável pelo posicionamento do fio durante o processo de enrolamento permite que este não interfira na montagem do mandril e, ao mesmo tempo, tenha um alcance suficiente para a fabricação de qualquer peça dentro das especificações.

O manual de instalação e configuração da máquina pode ser encontrado no apêndice B.

5. CONCLUSÕES

Verifica-se que é de extrema importância o conhecimento do processo de enrolamento filamentar para o desenvolvimento de uma máquina CNC que realiza tal processo de maneira otimizada. Através da aplicação de conhecimentos em mecânica dos materiais e da utilização de software de CAD e CAE, foi possível validar o projeto antes de sua implementação. O processo de montagem minucioso, bem como a alta qualidade de usinagem das peças, é fundamental para que se obtenha uma máquina que cumpra elevados requisitos de precisão.

Foi possível perceber que a utilização de uma redução de 200 vezes no eixo de rotação do mandril não é a ideal, já que tal eixo atinge no máximo 25 rpm, sendo esta a velocidade limitante da máquina. Vale lembrar que tal redução foi utilizada porque era a que se tinha disponível. Porém, é notável a precisão na movimentação dos eixos, graças a utilização dos servo-motores.

Apesar de se ter atingido o objetivo deste trabalho, para que a máquina esteja completamente apta a realizar o processo de enrolamento filamentar seriam necessários: um mandril aquecido por fluido, necessário ao enrolamento, bem como na secagem da resina impregnada na fibra; um tensionador capaz de controlar a tensão da fibra; e um software de CAM para a geração do código G responsável por acionar a máquina e enrolar a fibra de acordo com parâmetros de entrada.

O desenvolvimento de uma máquina CNC envolve diversas áreas da engenharia. Além disso, automatizar um sistema mecânico utilizando um sistema eletrônico controlado por computador é a essência da engenharia mecatrônica. A elaboração deste projeto colaborou de forma ampla para a formação em engenharia dos alunos envolvidos, pois foram percorridas todas as etapas do desenvolvimento de uma solução de engenharia, envolvendo o levantamento de requisitos, concepção do layout, dimensionamento de componentes, orçamentos, fabricação e montagem.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Faro, A. A. S., "Desenvolvimento de tubos compósitos produzidos por enrolamento filamentar para possíveis aplicações como risers rígidos." Dissertação de Mestrado UFRJ, 2008.
- [2]. Callister Jr, W. D., 2002, "Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução", 5 ed., Rio de Janeiro, LTC.
- [3]. "How the Pultrusion Process Works", The FRP Pultrusion Information Source, http://www.pultrusions.org/articles/pultrusion_works.html Acessado em 17/04/2012.
- [4]. Trinankur, Hazra. "A low cost 2 axis plc controlled filament winding machine with simplified fiber winding angle and tension control system". Tese de Mestrado, Dalhousie University, Nova Scotia, 2011.
- [5] Weck, M. Brecher, C. " Werkzeugmaschinen - Konstruktion und Berechnung", Editora Springer, Alemanha, 2006.
- [6]. "Soluções para Compósitos",
<http://www.owenscorning.com.br/processos.asp> Acessado: 21/04/ 2012.
- [7] http://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_iii/otm_iii_1.html Acessado em 19/04/2012
- [8] <http://www.jjmechanic.com/process/rtm.htm> Acessado em 18/04/2012
- [9] <http://in3.dem.ist.utl.pt/mscdesign/01tecmecc/notas6.pdf> Acessado em 20/04/2012.
- [10]. Young, B. e Powers, M. "Polyester Resin Operations",
<http://hank.baaqmd.gov/pmt/handbook/s11c12pd.htm> Acessado em 20/04/2012
- [11] Erdiller, E. S., "Experimental Investigation For Mechanical Properties Of Filament Wound Composite Tubes", Tese de Mestrado, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East University, 2004.

[12] Bora, B. "Design and Analysis of Filament Wound Composite Tubes". Tese de Mestrado, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East University, 2004.

[13] "Vibrações livres de sistemas de um grau de liberdade" Disponível em:

"<http://pt.scribd.com/doc/59759703/15/Vibracoes-Torcionais>", Acessado em: 16/09/12

[14] www.linuxcnc.org Acessado em 16/03/2012.

[15] The Enhanced Machine Controller User Handbook. V2.2, pp. 4

[16] HIWIN, "Single Axis Robot, Technical Information", catálogo de produtos, Taiwan, 2009.

[17] <http://www.helmantensioners.com/our-products/the-helman-tensioner/tensioner-explained.html> Acessado em 20/05/2012.

[18] HD Systems, "Harmonic Drive Gearing - Precision Gearing & Motion Control -CSF & CSG Series. Component Sets and Housed Units" catálogo de produtos, New York.

[19] "Bounding Natural Frequencies in Structures I: Gross Geometry, Material and Boundary Conditions" Disponível em: "http://www.objective-engineers.com/150_smi.pdf", Acessado em: 16/09/12.

[20] Budynas, R.; Nisbet, J. Shigley's Mechanical Engineering Design. 8th Edition. McGraw-Hill, New York, 2010. P. 396-400.

[21] Mitsubishi Electric Corporation, "General-Purpose AC Servo - EZMOTION MR-E Super General-Purpose Interface", Manual number: SH(NA)030075-A, Catálogo de produtos, Tokio, 05/2008.

[22] Mitsubishi Electric Corporation, "MR-Family Servo Amplifiers and Motors", Catálogo de produtos, Germany.

Apêndice A

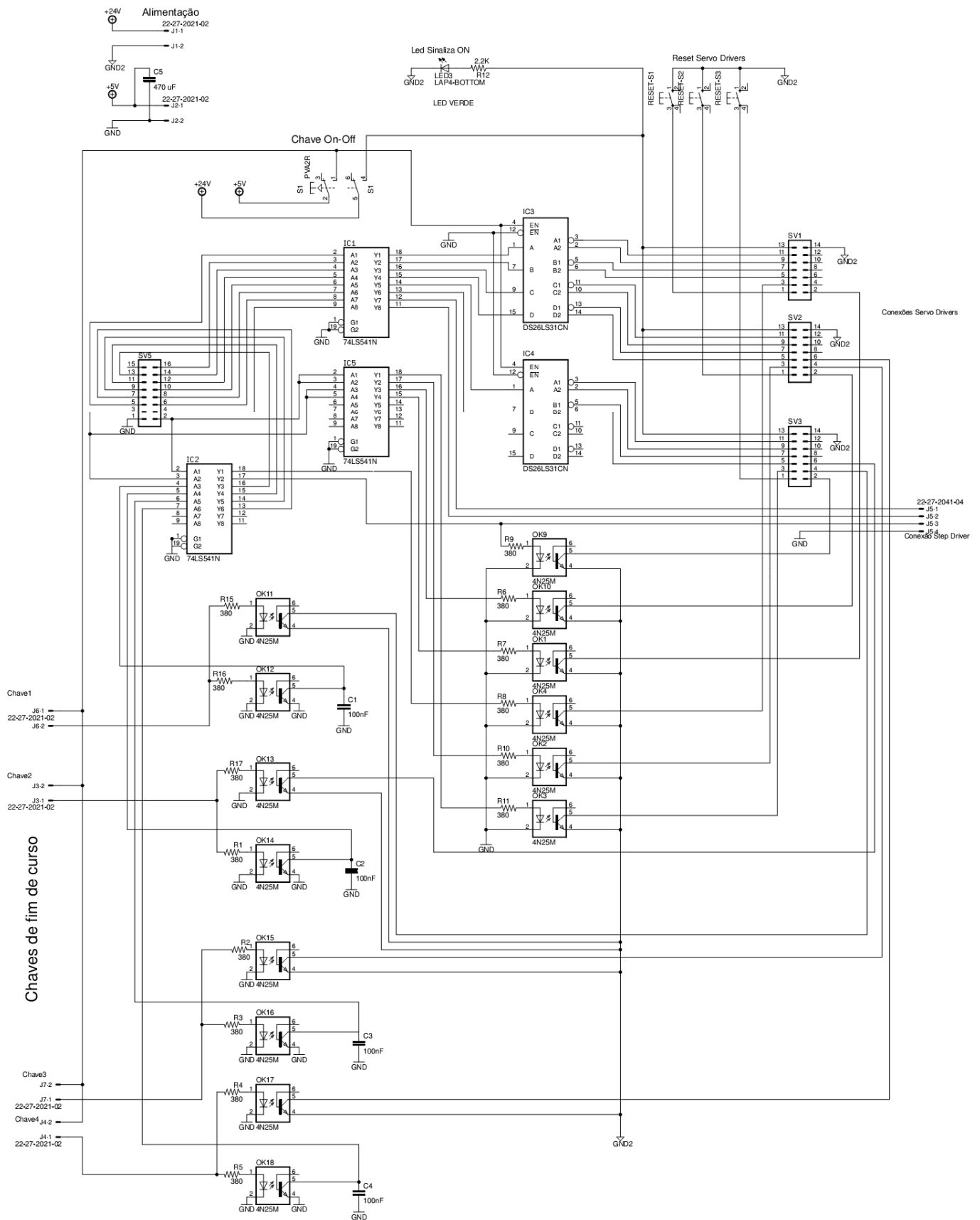


Figura A1 - Esquema elétrico da placa de interface

Apêndice B

Manual de instalação e configuração

Sistema Elétrico

O sistema elétrico é composto pelos seguintes itens, numerados e identificados na Figura 1:

- 1 – Fonte DC 5V;
- 2 – Fonte DC 24 V;
- 3 – Placa de interface;
- 4 – Step Driver ;
- 5 – Servo Drivers;
- 6 – Disjuntores;
- 7 – Contator Magnético.

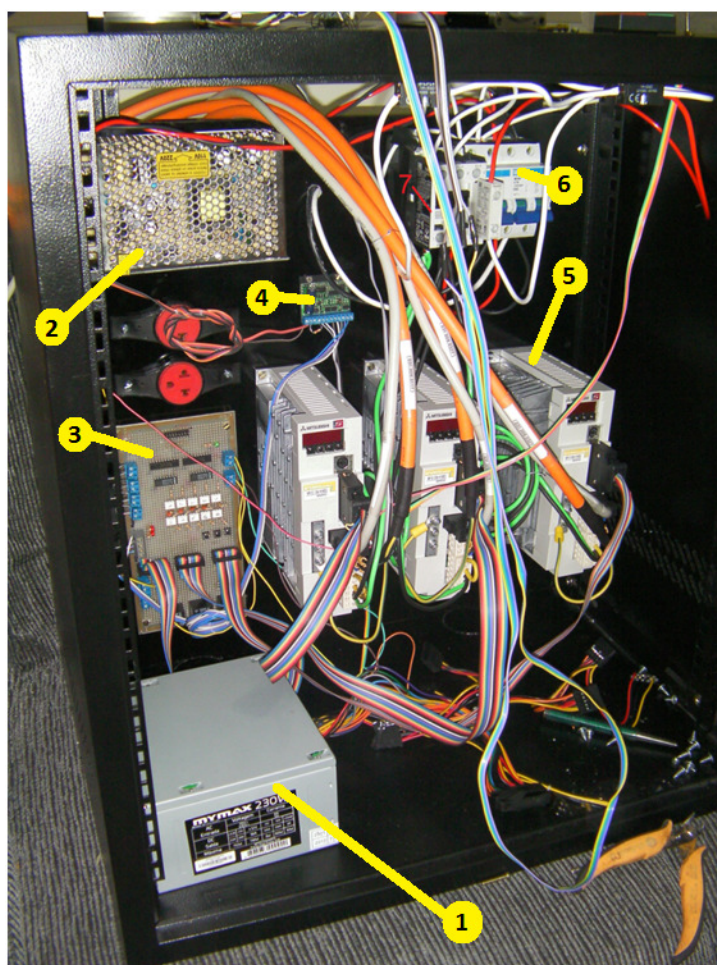


Figura 1 – Gabinete de controle da máquina

No caso de necessidade de substituição de algum desses componentes, as seguintes características devem ser observadas:

Item	Características importantes
Fonte DC 5V	A tensão mínima fornecida deve ser de 5.0V, e a máxima deve ser de 5.5V. Testes realizados na etapa de desenvolvimento revelaram que variabilidade na tensão fornecida por esse dispositivo causa ruídos que levam a movimentações indesejadas nos motores. A corrente exigida dessa fonte é da ordem de 1A.
Fonte DC 24 V	Essa fonte fornece corrente para os sinais de controle dos servo drivers e para o conjunto step driver/ step motor.
Placa de interface	O projeto esquemático dessa placa está no anexo A da monografia. É de extrema importância que essa placa seja substituída por uma confeccionada por métodos confiáveis (trilhas usinadas, por exemplo); a placa que disponibilizamos na máquina foi confeccionada manualmente, e está sujeita a problemas de mal funcionamento.
Step Driver	O modelo utilizado é o Gecko 251X. Para esclarecimentos a respeito do funcionamento desse item, verifique o manual do fabricante.
Servo Drivers	Os modelos utilizados são os: MR-E-10A-KH003, MR-E-20A-KH003, MR-E-40A-KH003
Disjuntores	Observar apenas a corrente elétrica limite dos disjuntores. De acordo com os manuais dos servo-drivers, o MR-E-40A-KH003 consome corrente máxima de 10A , enquanto os modelos MR-E-10A-KH003 e MR-E-20A-KH003 consomem no máximo 5A . O consumo do conjunto placa de interface / motor

	de passo / step driver é da ordem de 5A . Levar em conta esses valores de corrente em caso de substituição dos disjuntores.
Contator Magnético	Apenas as correntes elétricas e a tensão dos servo drivers devem ser observadas no caso da substituição desse dispositivo;

Instalação do sistema de proteção

O sistema de proteção engloba os botões liga/desliga e emergência, disjuntores, contadores magnéticos e relés. A figura abaixo representa as ligações entre esses dispositivos.

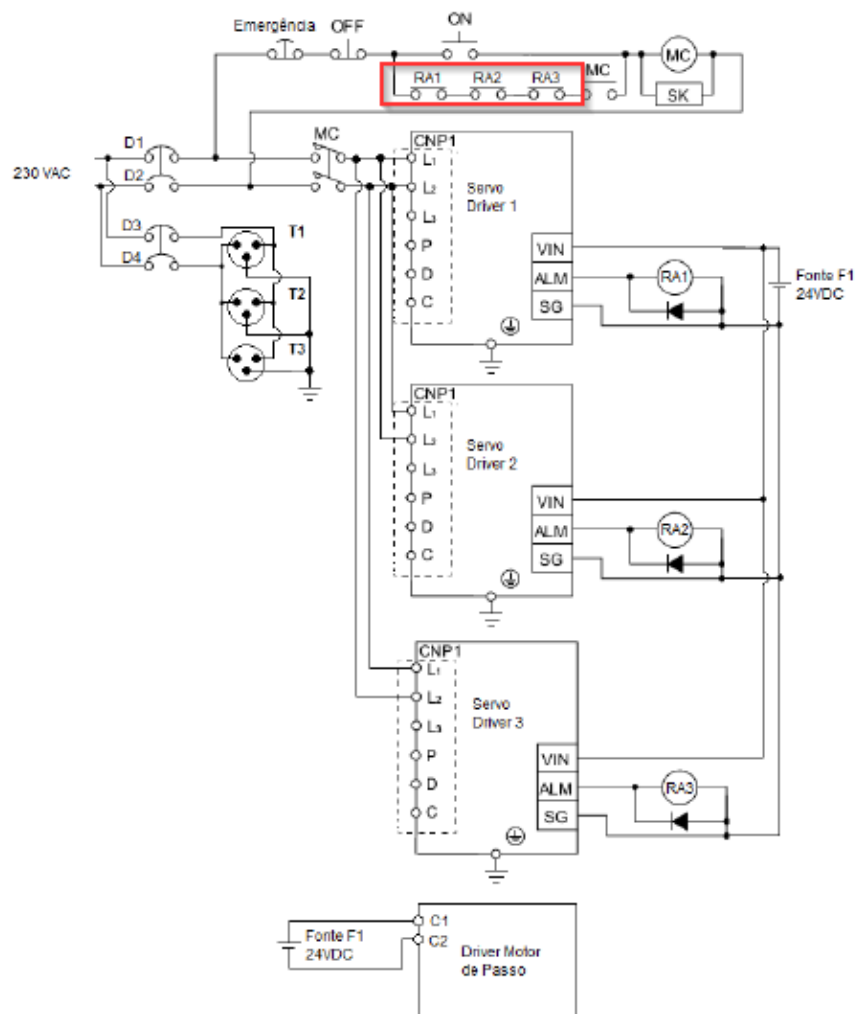


Figura 2 – Diagrama do circuito de proteção

As conexões entre os relés e os servo drivers estão consideradas no projeto da placa de interface e dos cabos que a conectam com os drivers.

Nota: As conexões marcadas em vermelho, na figura 2, não foram feitas na máquina, o que significa que os sinais de alarme não desligam o sistema.

Configuração do acionamento pelo Linux CNC

A primeira observação que deve ser feita em relação ao acionamento pelo Linux CNC é quanto ao tempo de latência do computador utilizado. Latência é o tempo que leva para o computador parar o que está fazendo e responder a uma requisição externa. Nesse caso, a requisição é o “*heartbeat*” periódico, que funciona como uma referência de tempo para a geração de pulsos. Quanto menor a latência, maior pode ser a frequência do “*heartbeat*” e, consequentemente, mais rápidos e com menos ruído serão os pulsos gerados. Não é necessário que o computador possua grande capacidade de processamento nem uma quantidade considerável de memória, mas a configuração utilizada deve garantir um baixo tempo de latência. Um dos fatores que em geral contribuem significativamente para diminuir esse tempo é a utilização de uma placa de vídeo off board. Há uma ferramenta do Linux CNC chamada *EMC2 Hal Latency Test* que mede o tempo de latência do computador, e serve como um indicativo da capacidade de gerar pulsos do computador em questão. Consulte a seção 4.5 do manual do Linux CNC para mais detalhes.

De acordo com o manual do Linux CNC, um tempo de latência de 15-20 microssegundos indica que o computador deve oferecer bons resultados no acionamento por pulsos. Tempos da ordem de 30-50 microssegundos indicam que se podem obter bons resultados, mas sua taxa máxima de pulsos pode ser um pouco desapontadora. Tempos da ordem de 100 microssegundos indicam que seu computador não é um bom candidato para acionar um sistema por pulsos. Valores maiores que 1 microssegundo indicam que seu computador não é um bom candidato para executar o Linux CNC, mesmo para acionamentos que não são feitos com pulsos.

O sistema foi projetado para ser acionado por pulsos oriundos da porta paralela.

O primeiro procedimento que deve ser feito é a instalação do driver para acionamento da porta paralela. Para informações a respeito desse passo, consulte a seção 8.1 do Manual do usuário do Linux CNC [The Enhanced Machine Controller User Handbook. V2.2]

Para criar os arquivos de configuração, utilize o *Linux CNC Stepconf*. Escolha uma configuração com **4** eixos (XYZA), unidades em milímetro, e na tela mostrada na Figura 4a configure os pinos da porta paralela da seguinte forma:

Pino	Função	Invertido
1	ESTOP Out	Não
2	A Step	Sim
3	A Direction	Sim
4	Y Step	Sim
5	Y Direction	Não
6	Z Step	Sim
7	Z Direction	Sim
8	X Direction	Não
9	X Step	Sim
10	Maximun Y	Não
11	Minimun Y	Não
12	Maximun Z	Não
13	Minimun Z	Não
14	none	
15	none	
16	none	
17	Amplifier Enable	Não

Essa configuração considera os eixos orientados da seguinte forma:

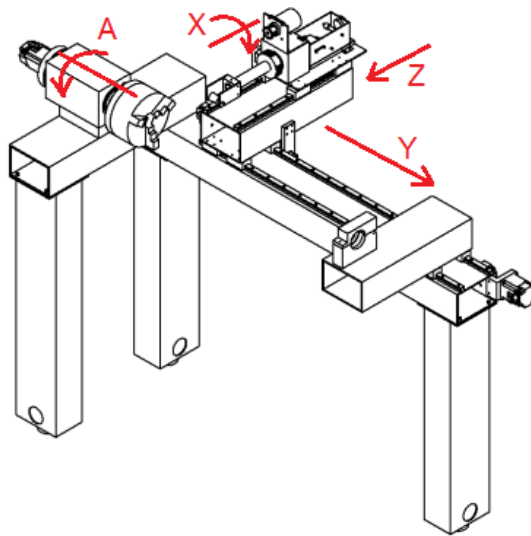
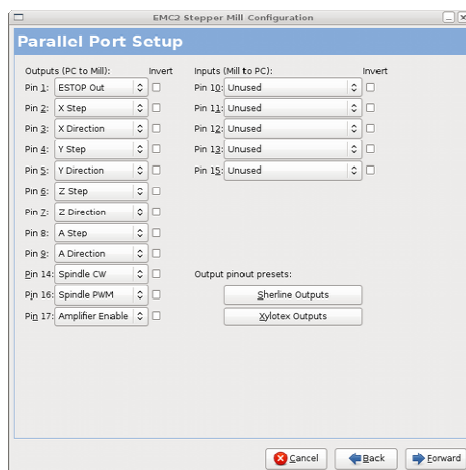
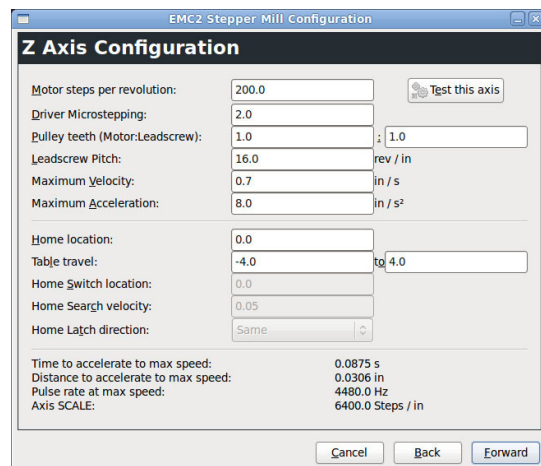


Figura 3 – Orientação dos eixos para configuração do sistema de acionamento



(a)



(b)

Figura 4 – Configuração Linux CNC

Para os próximos passos da configuração, os seguintes itens devem ser levados em conta:

A redução utilizada no eixo árvore é de 200 vezes. O passo do fuso utilizado no eixo Z é de 5 mm, enquanto o passo utilizado no eixo Y é de 10 mm. Outro fator de extrema importância a ser considerado é a redução

eletrônica. Essa redução é configurada através dos parâmetros 3 e 4 do servo driver utilizado. Quando a redução eletrônica estiver configurada como 1:1 (ou seja *Parâmetro 3 = 1 e Parâmetro 4 = 1*) o motor precisa de 131072 pulsos para dar uma revolução.

Considere o seguinte exemplo de configuração: Para um fuso de passo 10 mm/rev, parâmetro 3 = 32, parâmetro 4 = 1, a movimentação da máquina será de 10 mm para cada 4096 pulsos.

Considerando a Figura 4b, os parâmetros devem ser configurados da seguinte forma:

Eixo X (acionado pelo motor de passo)	
Motor steps per revolution:	400
Driver Microstepping:	5.0
Pulley teeth:	1:1
Leadscrew Pitch:	105 rev/mm
Maximum Velocity:	360 mm/s
Maximum Acceleration	200 mm/s ²
Home location	0.0
Table travel	-99999.0 to 99999.0
Eixo Y	
Motor steps per revolution:	*
Driver Microstepping:	1.0
Pulley teeth:	1:1
Leadscrew Pitch:	10 rev/mm
Maximum Velocity:	30 mm/s
Maximum Acceleration	** mm/s ²
Home location	0.0
Table travel	0 to 700
Eixo Z	
Motor steps per revolution:	*
Driver Microstepping:	1.0

Pulley teeth:	1:1
Leadscrew Pitch:	5 rev/mm
Maximum Velocity:	30 mm/s
Maximum Acceleration	** mm/s ²
Home location	0.0
Table travel	0 to 300
Eixo A (árvore)	
Motor steps per revolution:	*
Driver Microstepping:	1.0
Pulley teeth:	1:1
Leadscrew Pitch:	1.8 deg/rev
Maximum Velocity:	90 deg/s
Maximum Acceleration	** deg/s ²
Home location	0.0
Table travel	-99999.0 to 99999.0
* Valores dependem da configuração realizada na redução eletrônica dos servo drivers. Se os parâmetros 3 e 4 dos servo drivers forem iguais a 32 e 1, respectivamente, o valor desse parâmetro deve ser 4096, conforme exemplo dado anteriormente. **Os valores desse parâmetro devem ser calibrados de forma a oferecer movimentos suaves ou bruscos, de acordo com a aplicação. A opção “<i>test this axis</i>” mostrada na Figura 4b permite explorar as possibilidades de configuração por meio da visualização de movimentos da máquina.	

As chaves de fim de curso têm duas funções nesse projeto:

- Paralisam o funcionamento dos motores no sentido da chave acionada, permitindo apenas que eles girem no sentido oposto;
- Notificam o Linux CNC, o que paralisa a execução do programa.

Essas duas funções são independentes. A primeira depende apenas dos servo drivers, enquanto a segunda depende da configuração no Linux CNC.

Isso significa que mesmo que os pinos 10 a 14 da porta paralela sejam configurados como *none*, os motores param quando as chaves de fim de curso são acionadas.

É importante relatar que foram identificados alguns bugs do Linux CNC durante a etapa de configuração das chaves de fim de curso. Os problemas identificados (ao testar a movimentação dos eixos) não foram investigados, mas se solucionavam ao reiniciar o computador e reconfigurar a máquina no *stepconf* retirando as funções dos pinos 10 a 14 da porta paralela.

Um detalhe importante a ser observado é a alimentação da placa de interface. As conexões devem estar de acordo com a figura abaixo:

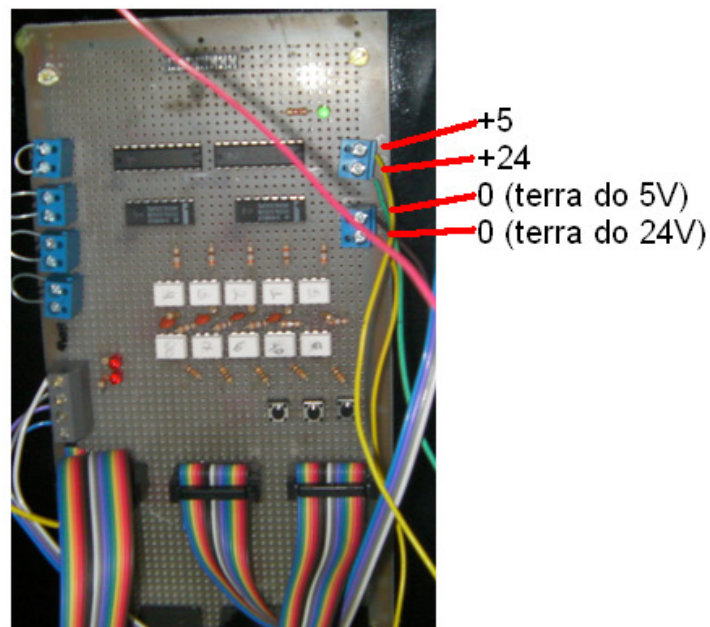
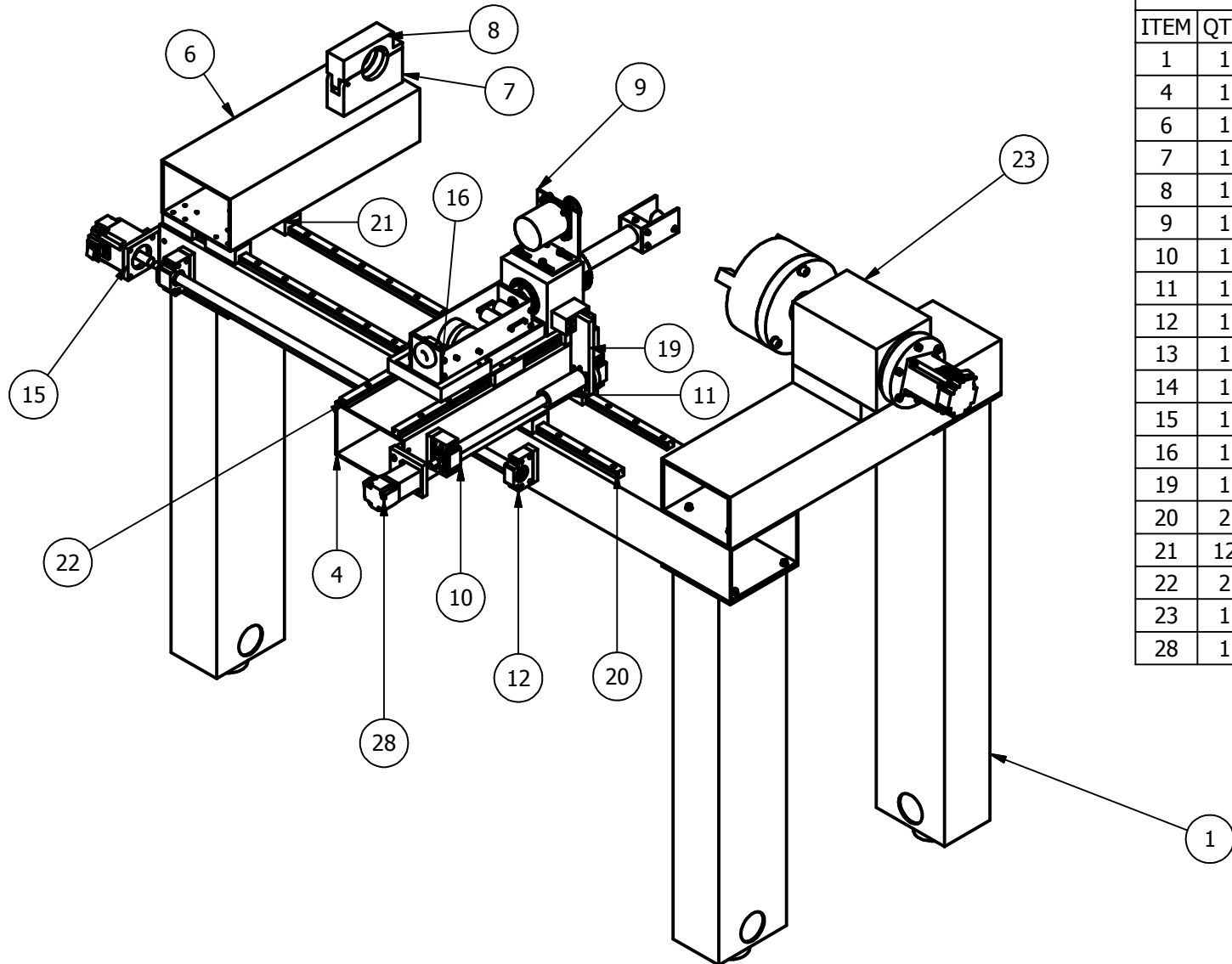


Figura 5 - Alimentação da placa de interface

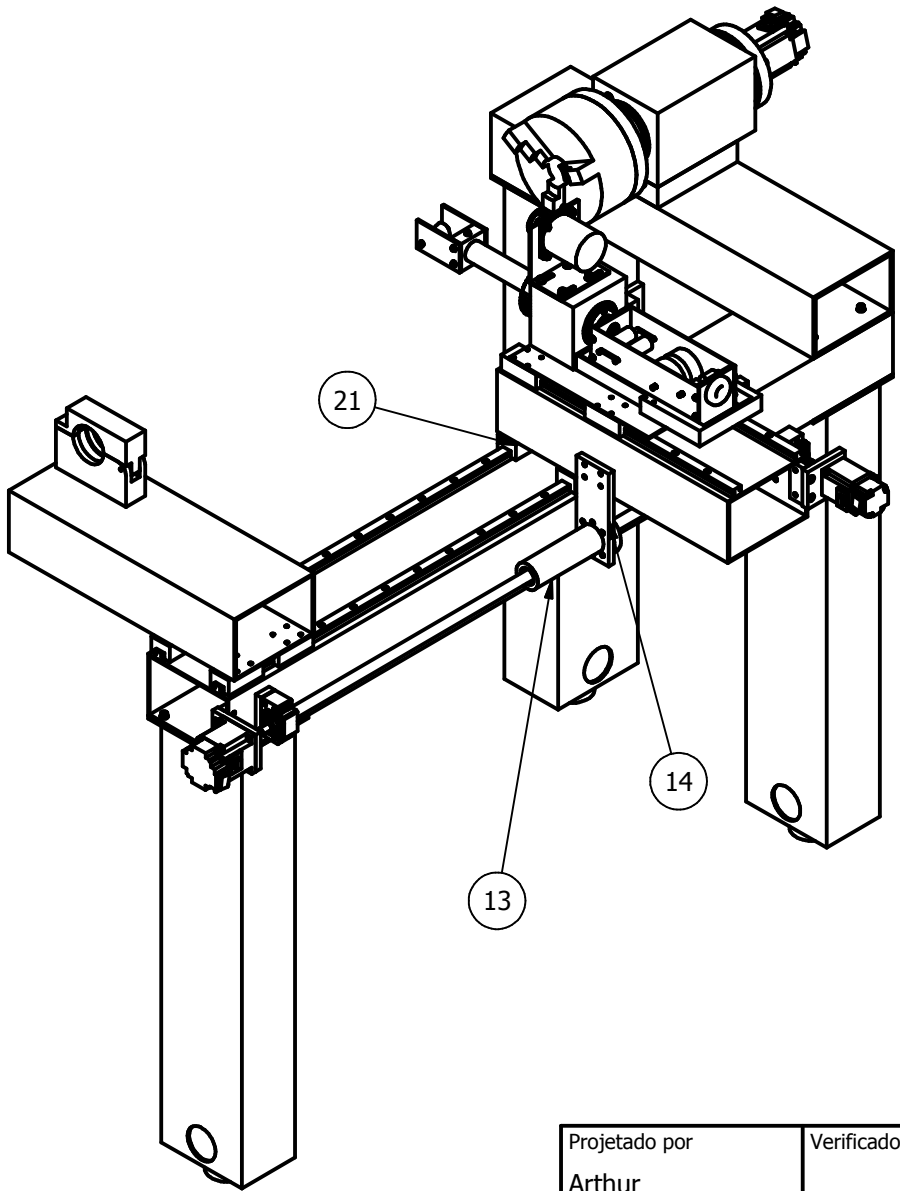
Apêndice C

Os desenhos de fabricação e conjunto se encontram a seguir.



LISTA DE PEÇAS			
ITEM	QTD	NÚM. DE PEÇA	DESCRIÇÃO
1	1	Estrutura	Pag. 3
4	1	Braço/Apoio da Guia Menor	Pag. 11
6	1	Braço/Apoio do Mancal Bipart.	Pag. 12
7	1	mancal bipartido inf	Pag. 13
8	1	mancal bipartido sup	Pag. 14
9	1	Grau 4	Pag. 24
10	1	Montagem fuso menor	Pag. 55
11	1	castanha menor	comercial
12	1	Montagem fuso maior	Pag. 54
13	1	castanha maior	comercial
14	1	flange maior	Pag. 19
15	1	motor2 + acoplamento	Pag. 15
16	1	banho	Pag. 44
19	1	flange menor	Pag. 20 e 21
20	2	trilho BGXH15BN	comercial
21	12	patin BGXH15BN	comercial
22	2	trilho BGXH15BN430	comercial
23	1	Acionamento Mandril	Pag. 36
28	1	motor1 + acoplamento	Pag. 15

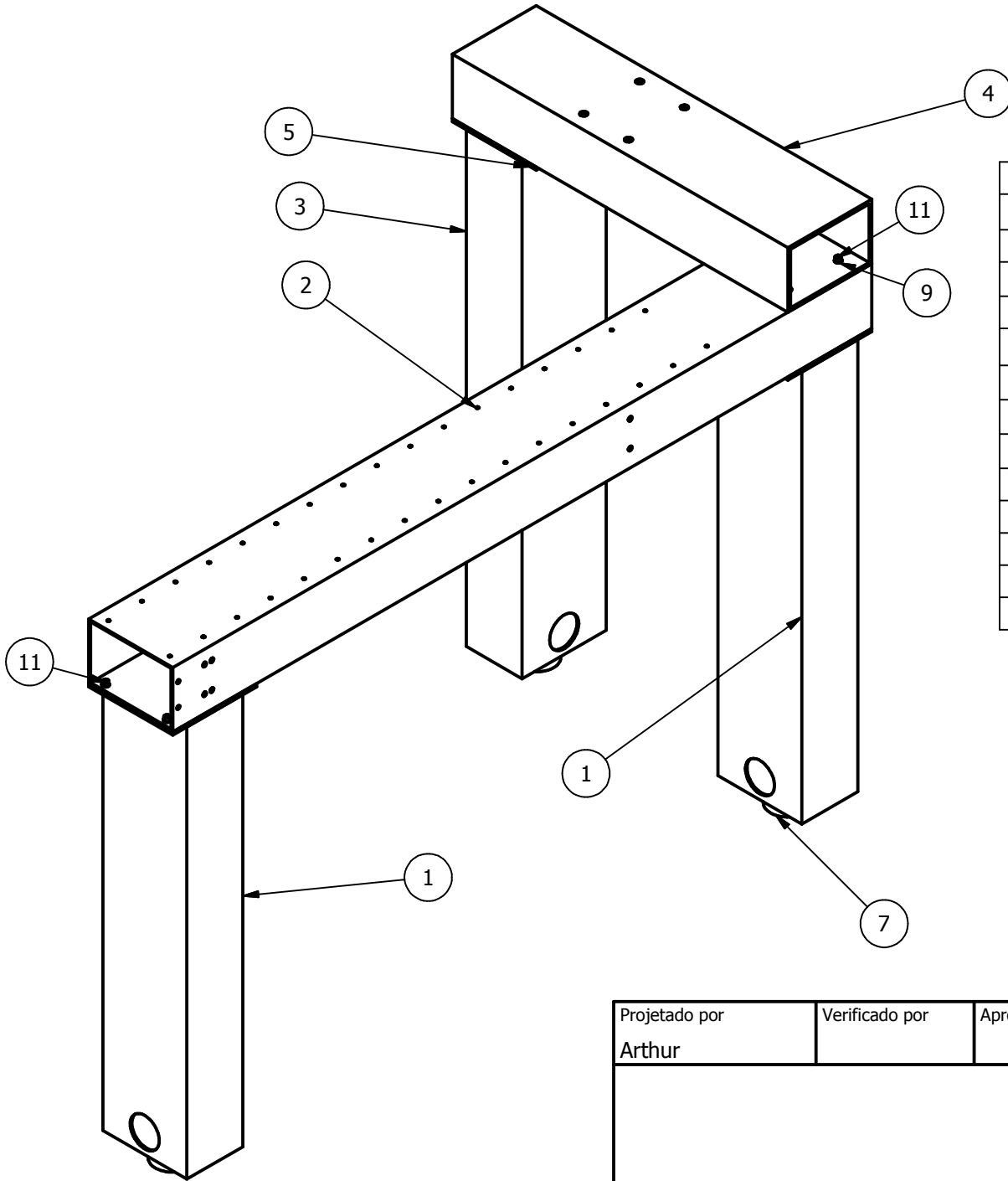
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Arthur					
			Montagem Completa		
			desenhos finais	Edição	Folha 1 / 55



LISTA DE PEÇAS

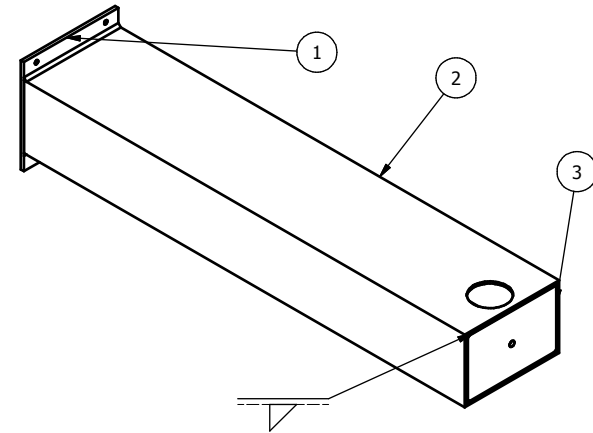
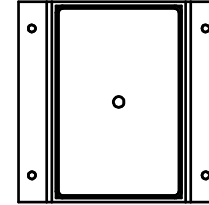
ITEM	QTD	NÚM. DE PEÇA	DESCRIÇÃO
1	1	Estrutura	Pag. 3
4	1	Braço/Apoio da Guia Menor	Pag. 11
6	1	Braço/Apoio do Mancal Bipart.	Pag. 12
7	1	mancal bipartido inf	Pag. 13
8	1	mancal bipartido sup	Pag. 14
9	1	Grau 4	Pag. 24
10	1	Montagem fuso menor	Pag. 55
11	1	castanha menor	comercial
12	1	Montagem fuso maior	Pag. 54
13	1	castanha maior	comercial
14	1	flange maior	Pag. 19
15	1	motor2 + acoplamento	Pag. 15
16	1	banho	Pag. 44
19	1	flange menor	Pag. 20 e 21
20	2	trilho BGXH15BN	comercial
21	12	patin BGXH15BN	comercial
22	2	trilho BGXH15BN430	comercial
23	1	Acionamento Mandril	Pag. 36
28	1	motor1 + acoplamento	Pag. 15

Projetado por Arthur	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
			Montagem Completa		
			desenhos finais	Edição	Folha 2 / 55

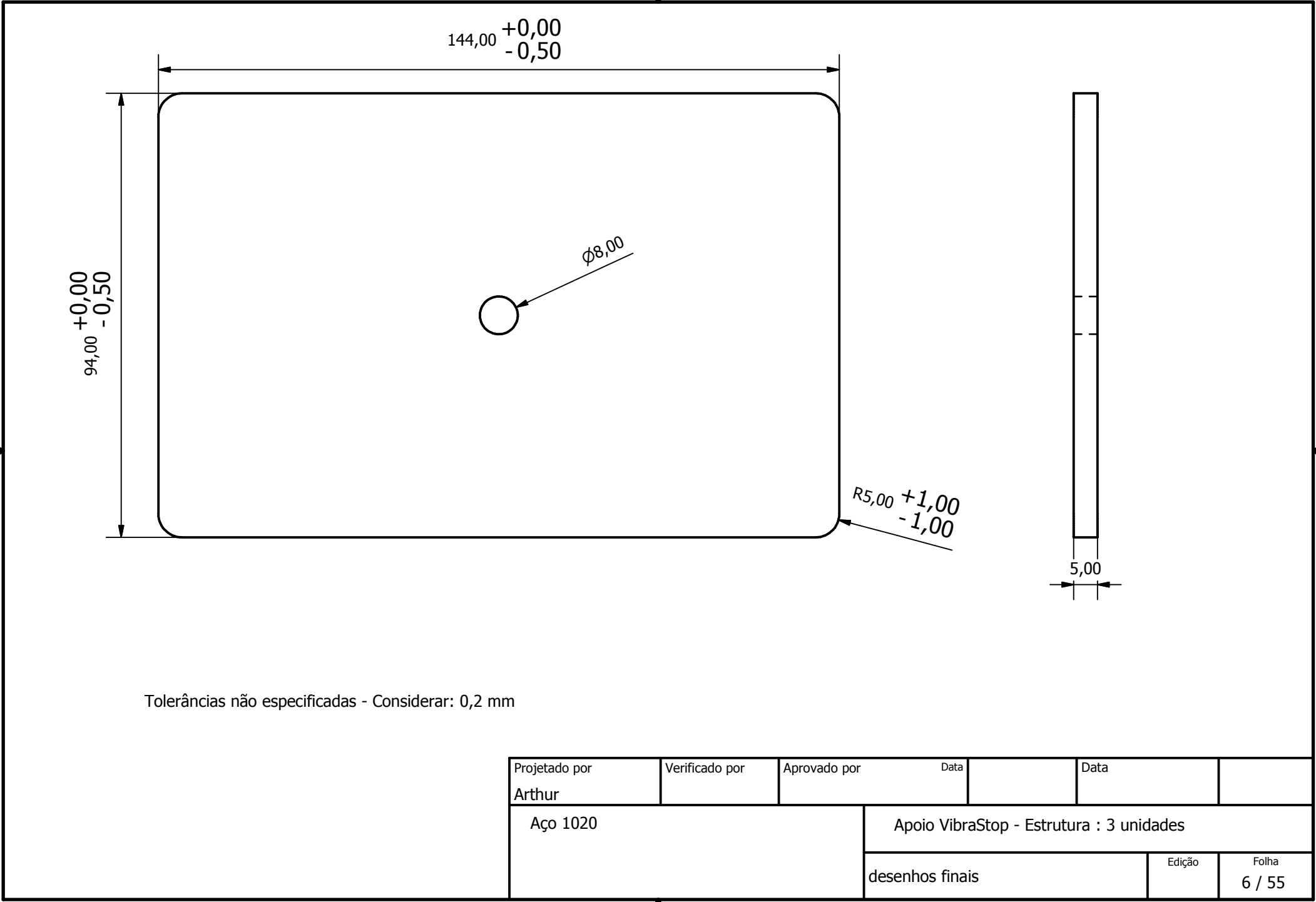


LISTA DE PEÇAS			
ITEM	QTD	NÚM. DE PEÇA	DESCRIÇÃO
1	2	Perna 700 mm	Pag. 7
2	1	Corpo / Apoio Guia Maior	Pag. 9
3	1	Perna 800 mm	Pag. 8
4	1	Apoio Acionamento	Pag. 10
5	3	bracket	Pag. 5
6	3	suporte vibrastop	Pag. 6
7	3	vibrastop	comercial
8	4	ISO 4762 - M5 x 20	Parafuso
9	32	ISO 7089 - 5 - 140 HV	Arruelas
10	4	ISO 4032 - M5	Porcas
11	12	ISO 4762 - M5 x 16	Parafuso
12	12	ISO 4035 - M5	Porcas

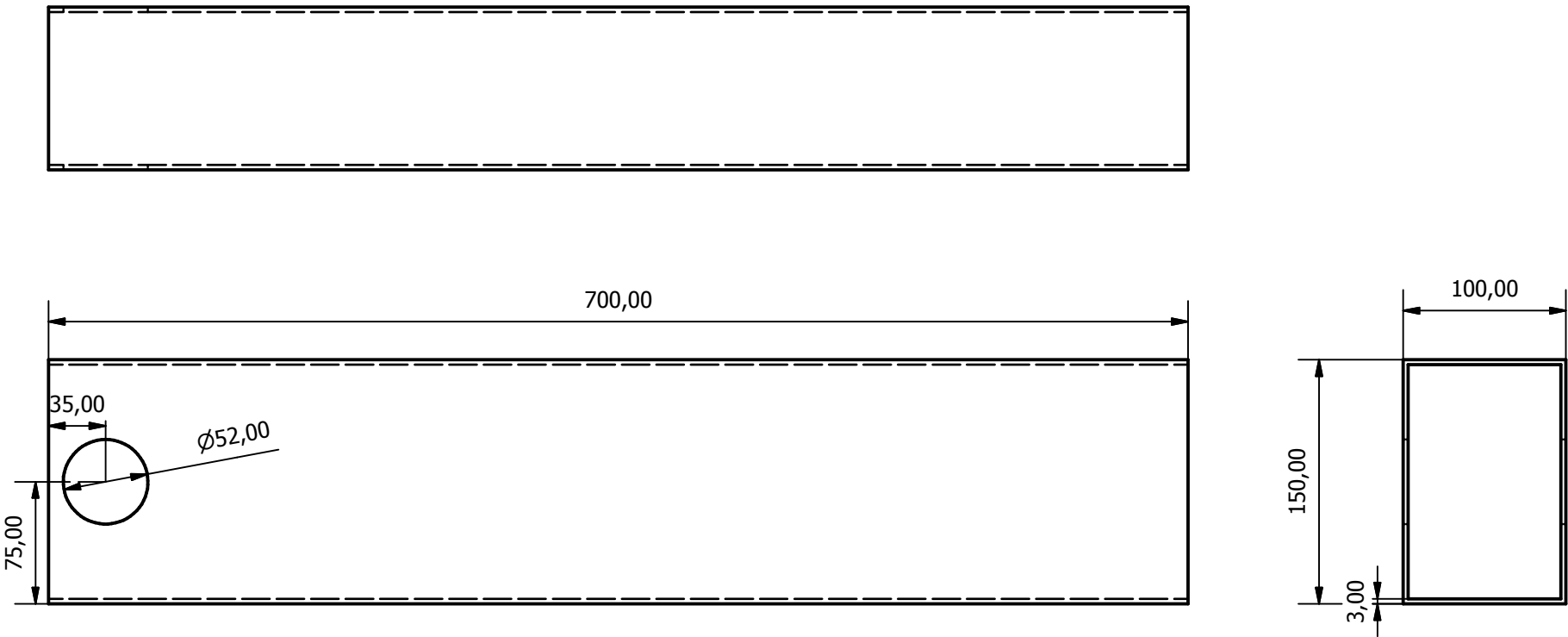
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Arthur					
		Montage Estrutura			
		desenhos finais		Edição	Folha
					3 / 55

3. $\triangleleft$ C

CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

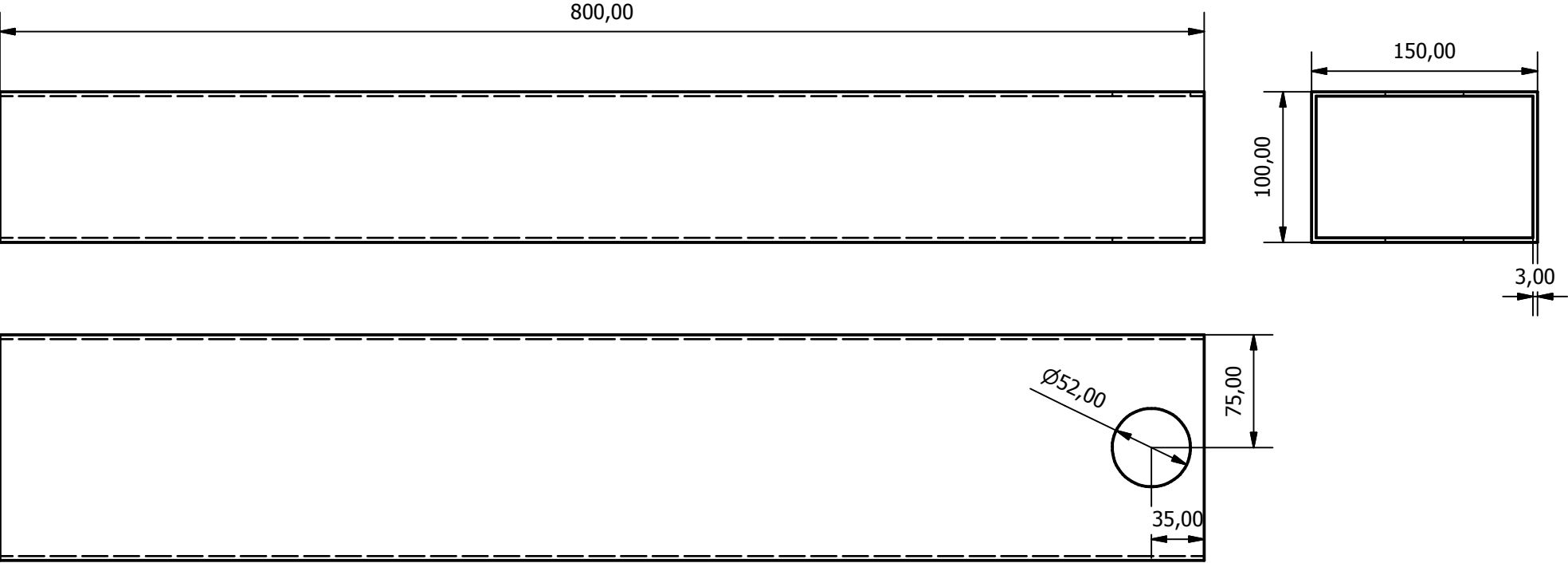


Tolerâncias não especificadas - Considerar: 0,2 mm



Tolerâncias não especificadas - Considerar: 0,5 mm

Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
Aço 1020			Perna Menor - Estrutura : 2 unidades			
desenhos finais					Edição	Folha
						7 / 55

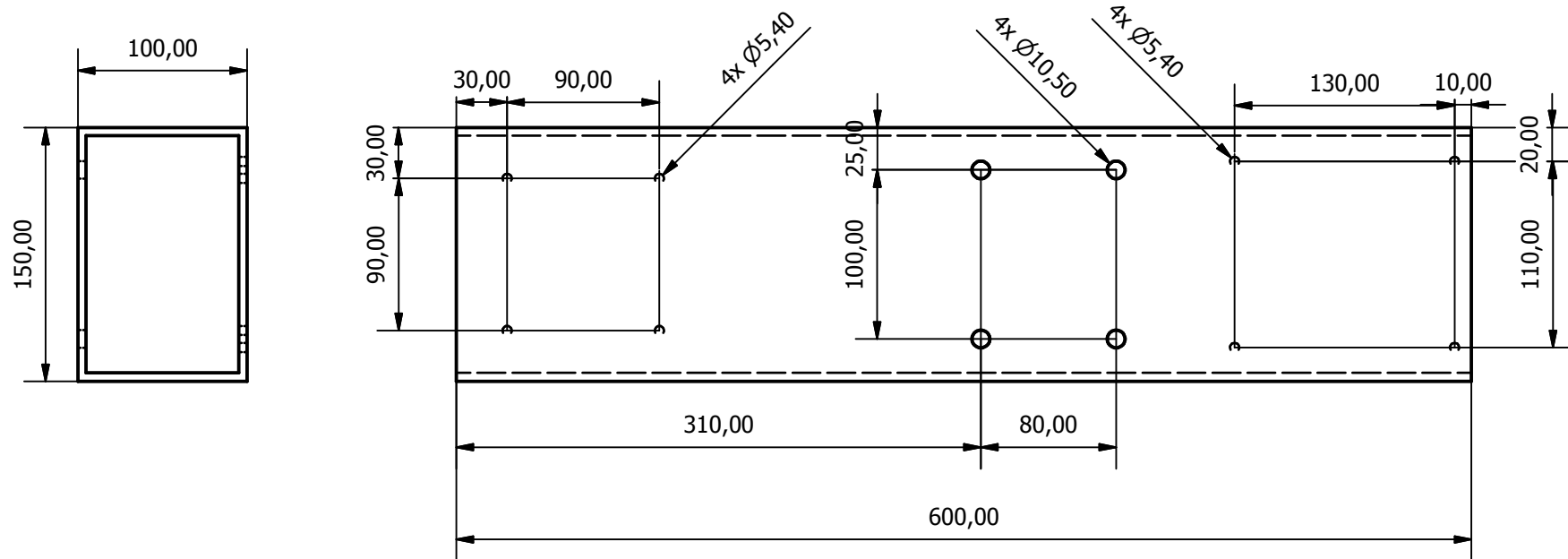


Tolerâncias não especificadas - Considerar: 0,5 mm

Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
Aço 1020			Perna Maior - Estrutura			
desenhos finais					Edição	Folha
						8 / 55

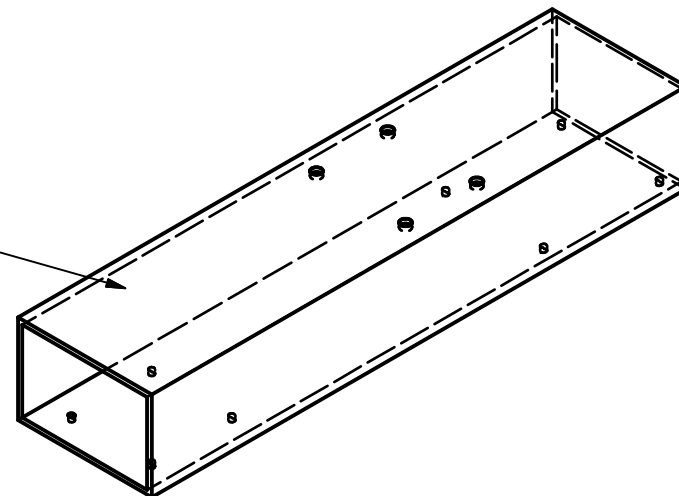


Projetado por Arthur	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Aço 1020		Corpo - Estrutura			
		desenhos finais		Edição	Folha 9 / 55

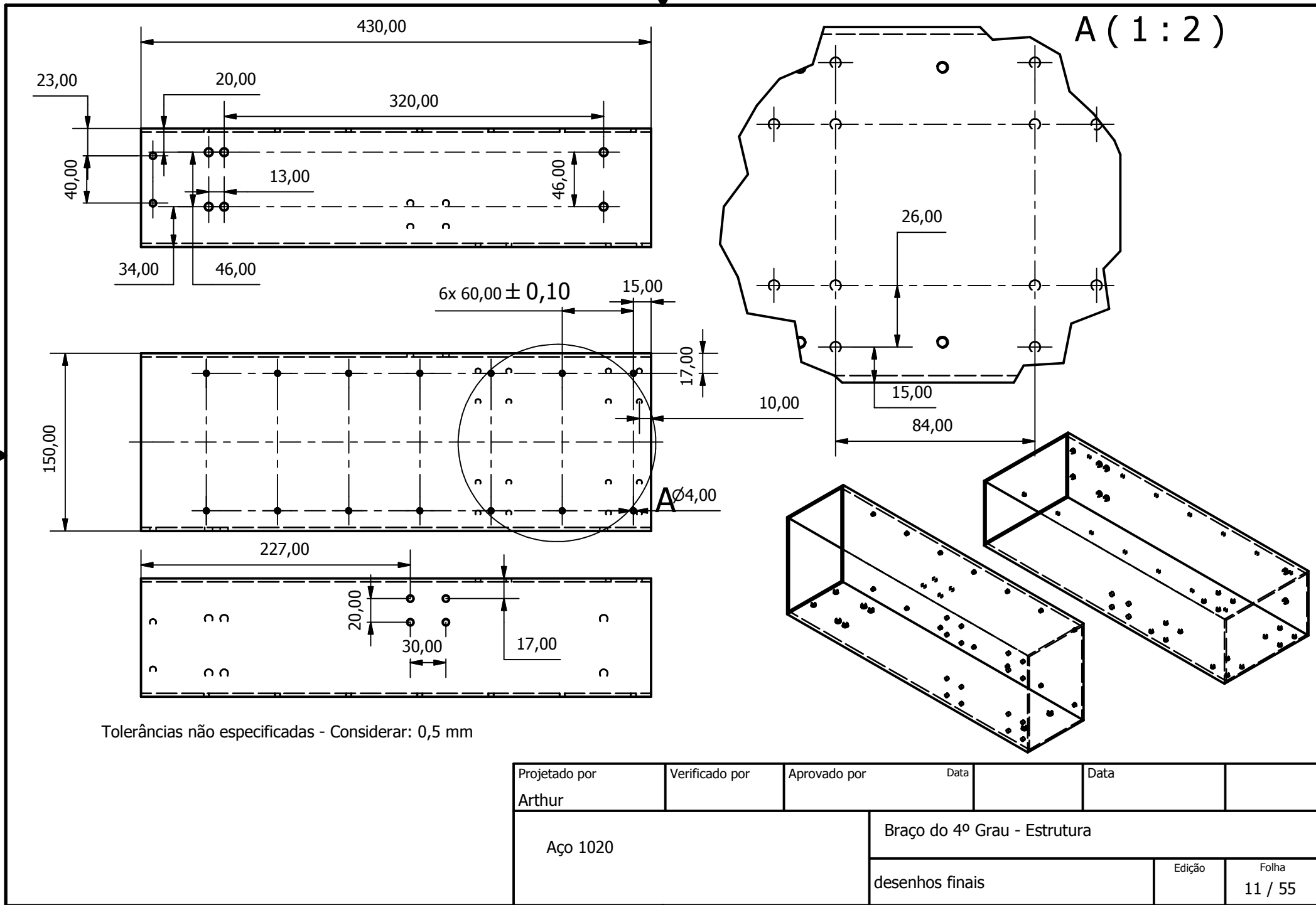


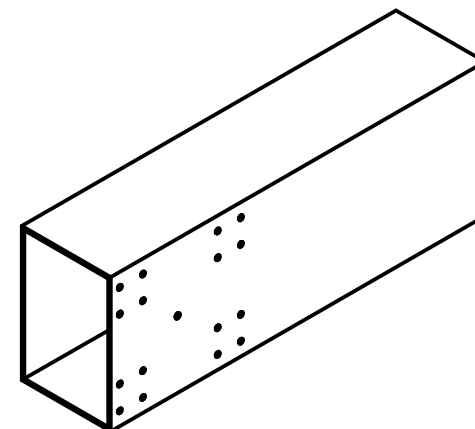
Tolerâncias não especificadas - Considerar: 0,5 mm

Retificado
0,4

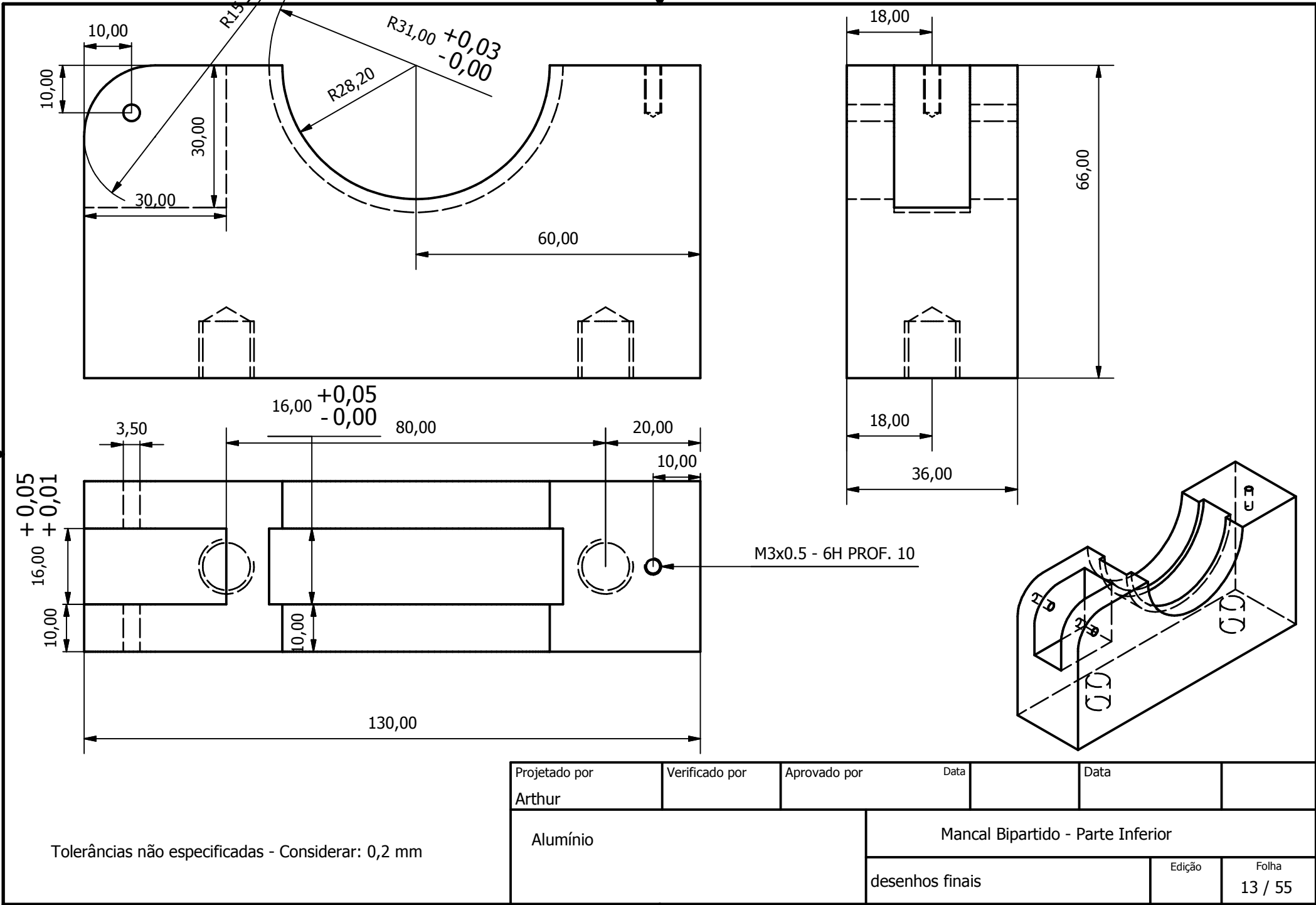


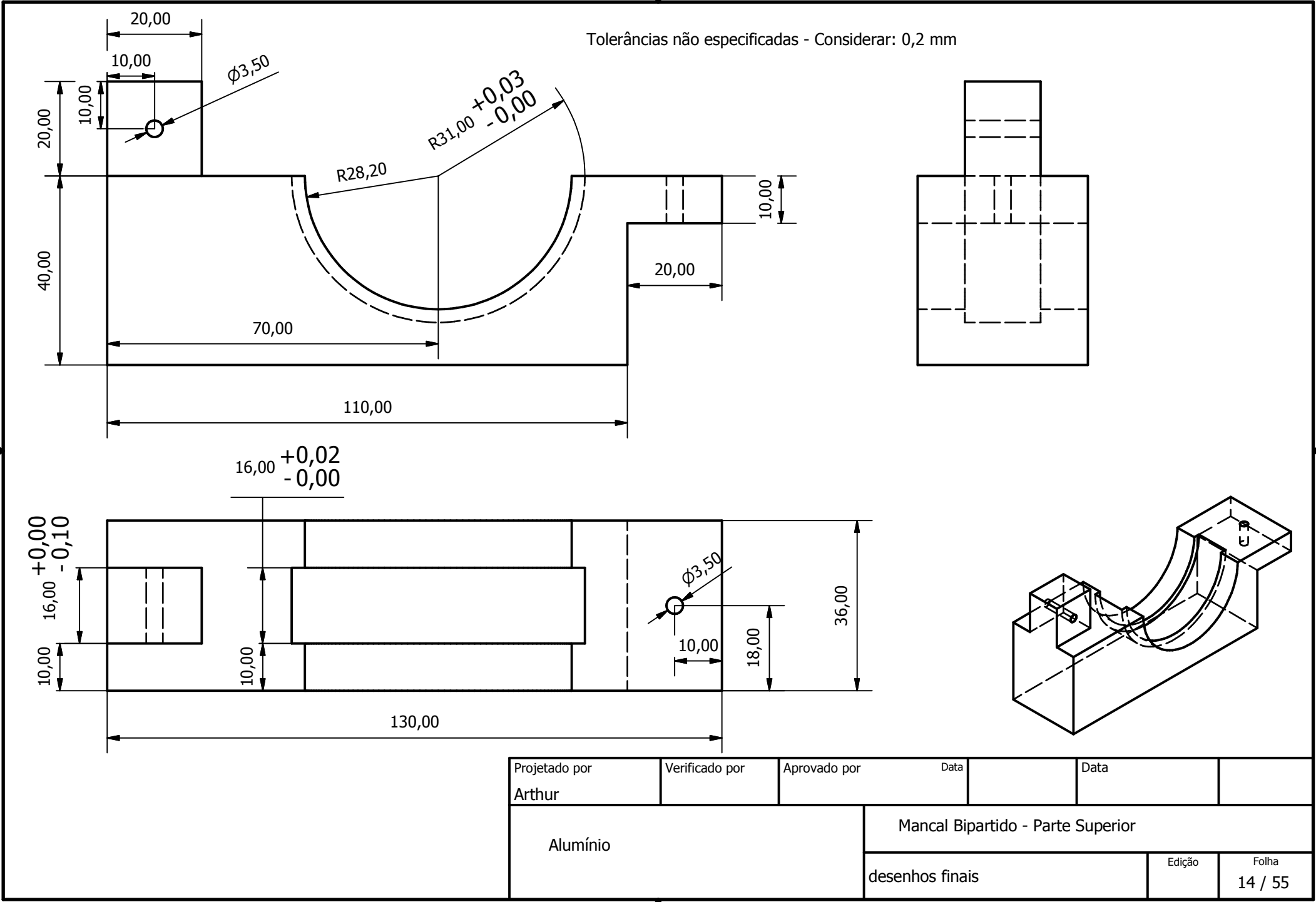
Projetado por Arthur	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Aço 1020			Apoio Acionamento - Estrutura		
desenhos finais				Edição	Folha 10 / 55





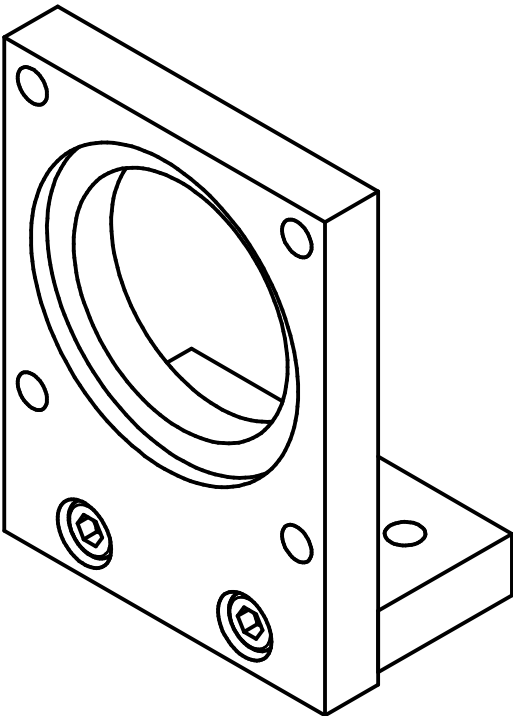
Projetado por Arthur	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Aço 1020			Braço do Mancal Bipartido - Estrutura			
			desenhos finais		Edição	Folha 12 / 55





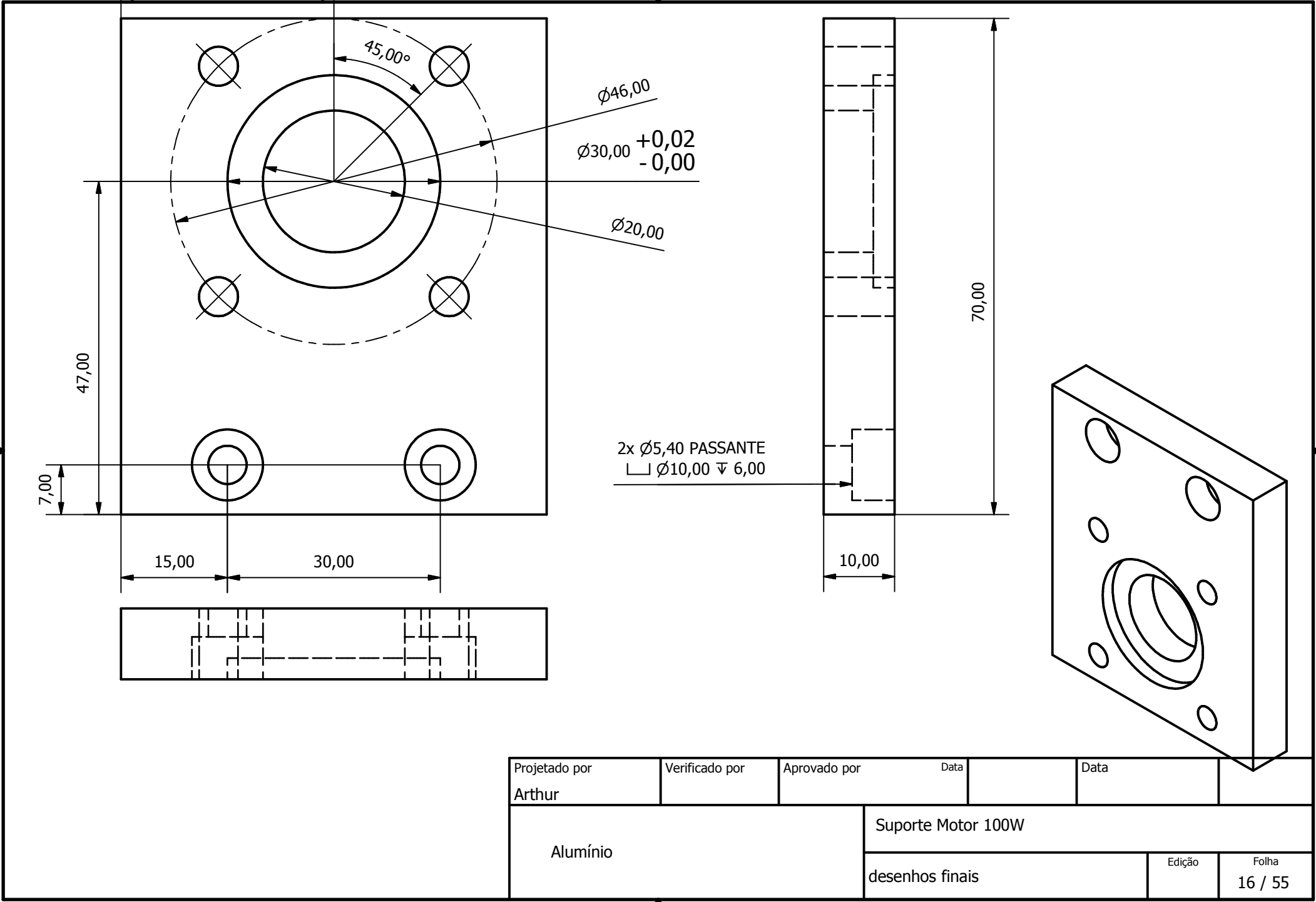


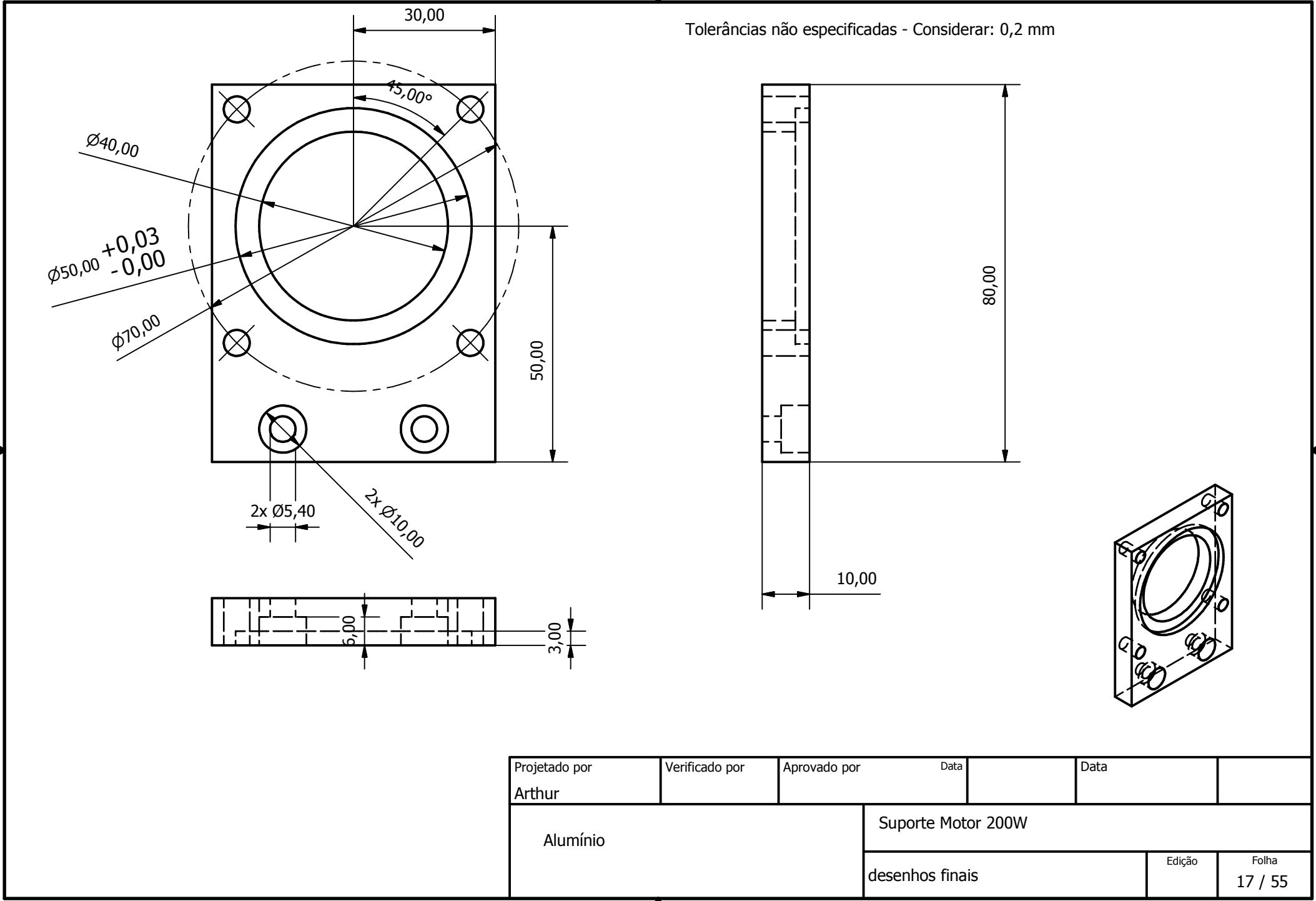
LISTA DE PEÇAS			
ITEM	QTD	NÚM. DE PEÇA	DESCRIÇÃO
1	1	acoplamento motor 200w	
2	1	acoplamento2 motor 200w	
3	2	ISO 4762 - M5 x 12	Parafuso Allen de cabeça

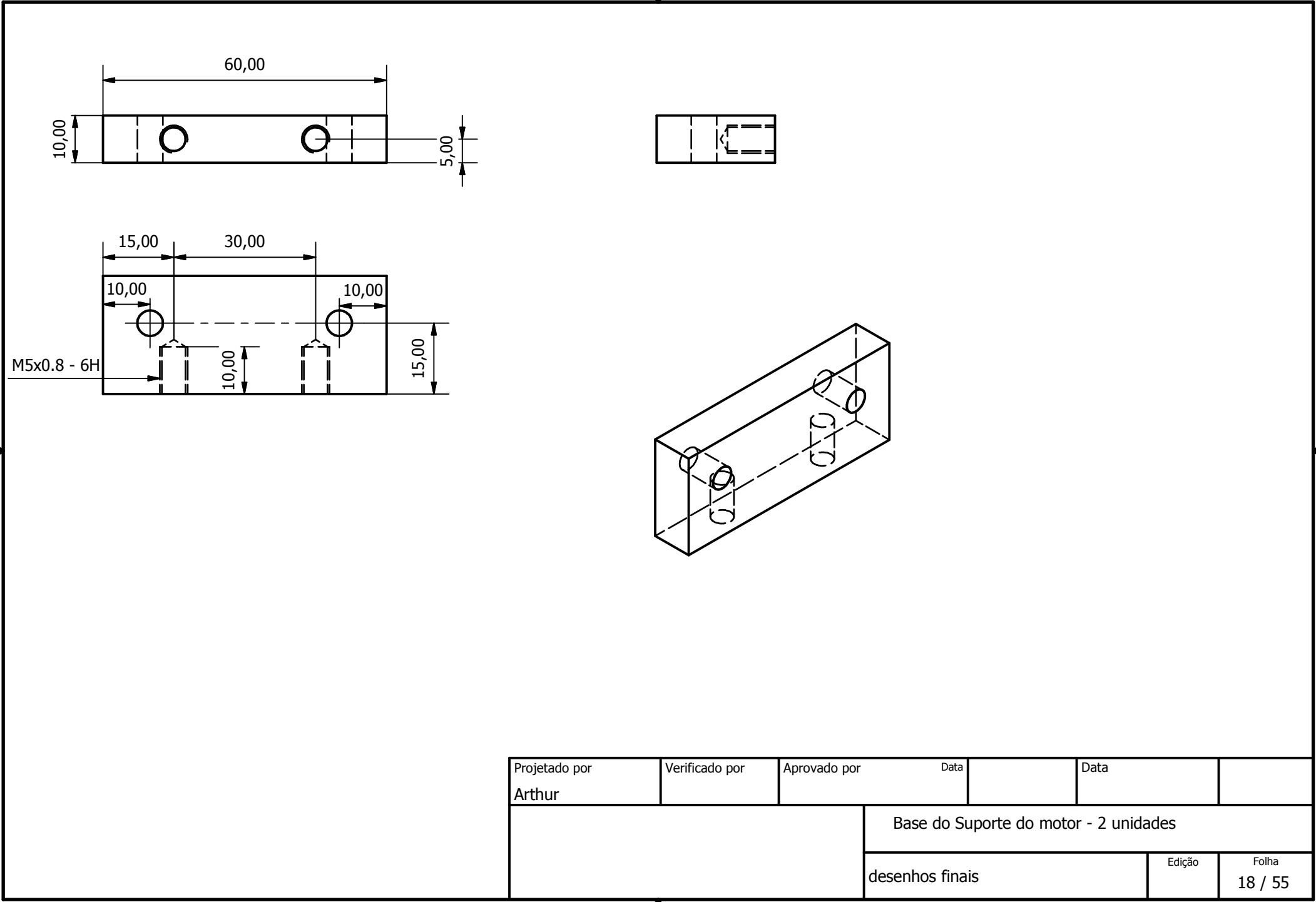


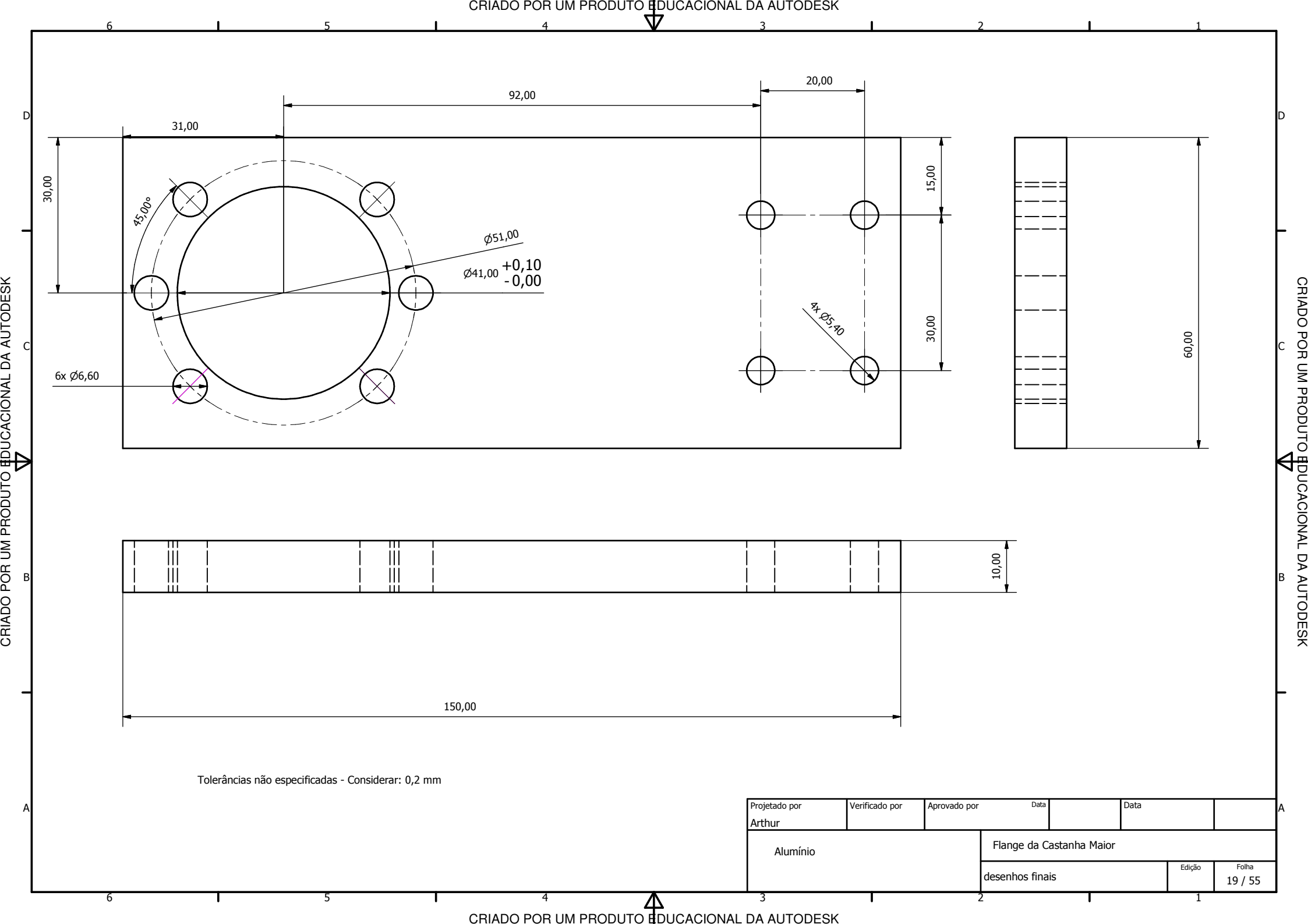
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
			Montagem do suporte do motor			
			desenhos finais	Edição	Folha	
					15 / 55	

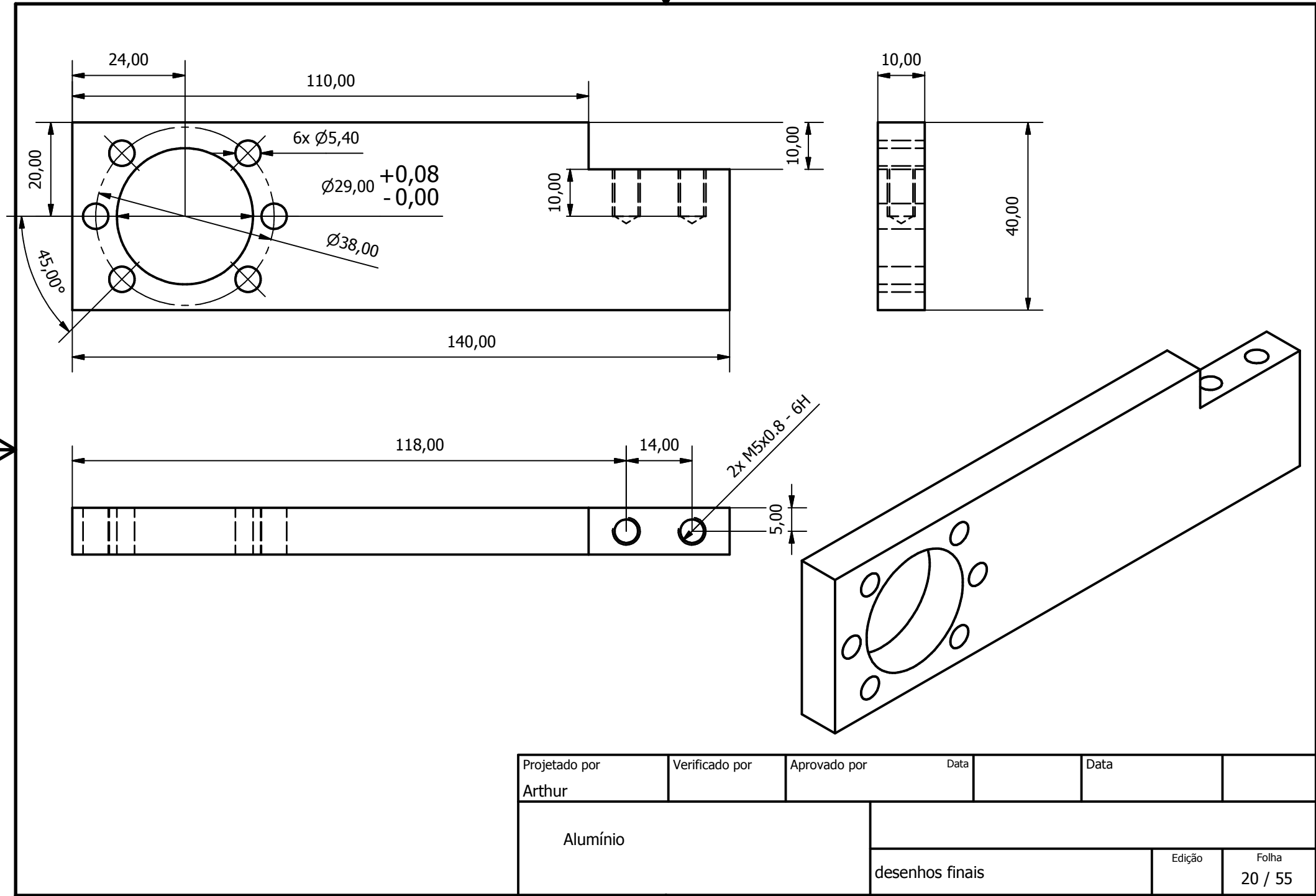


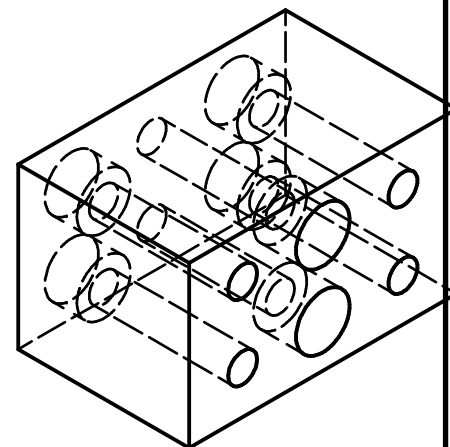
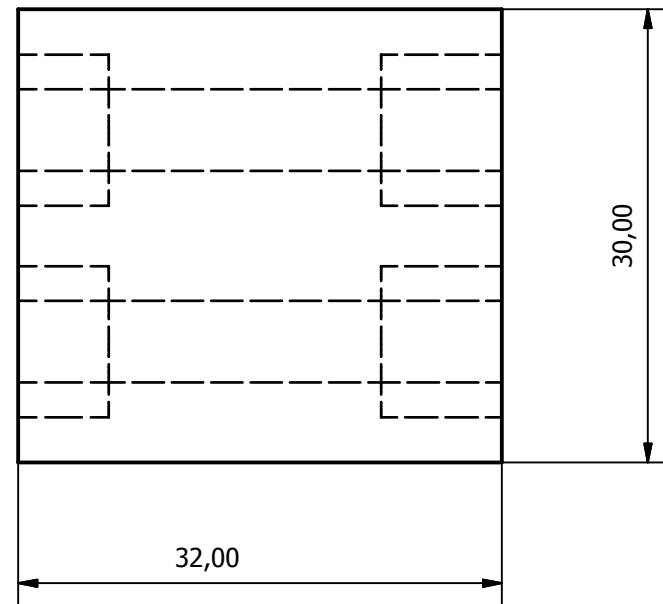
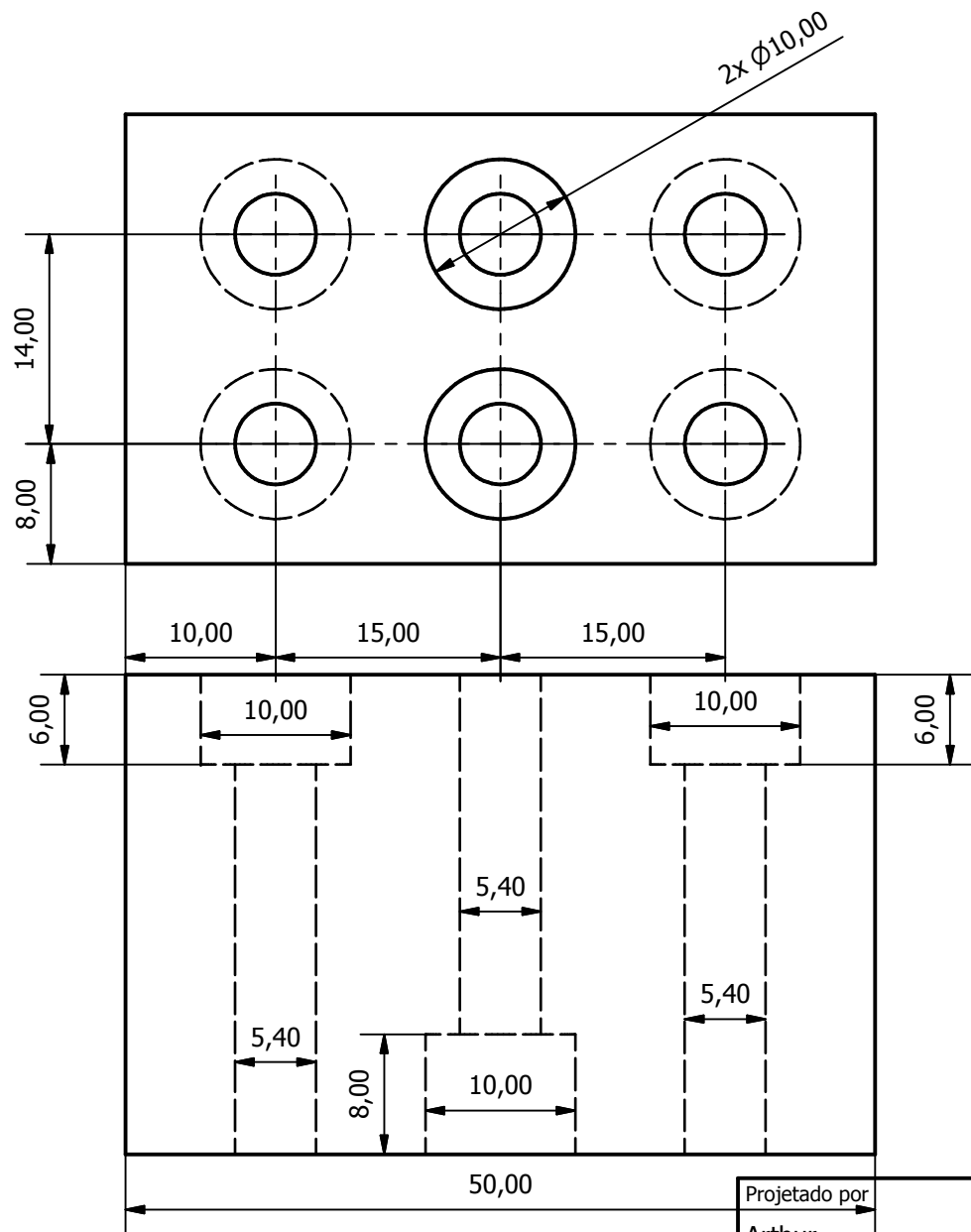




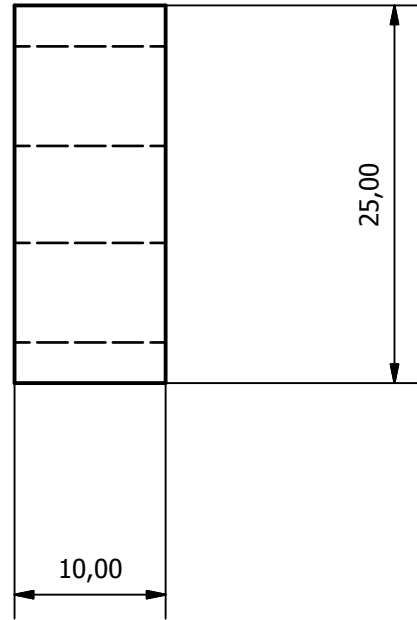
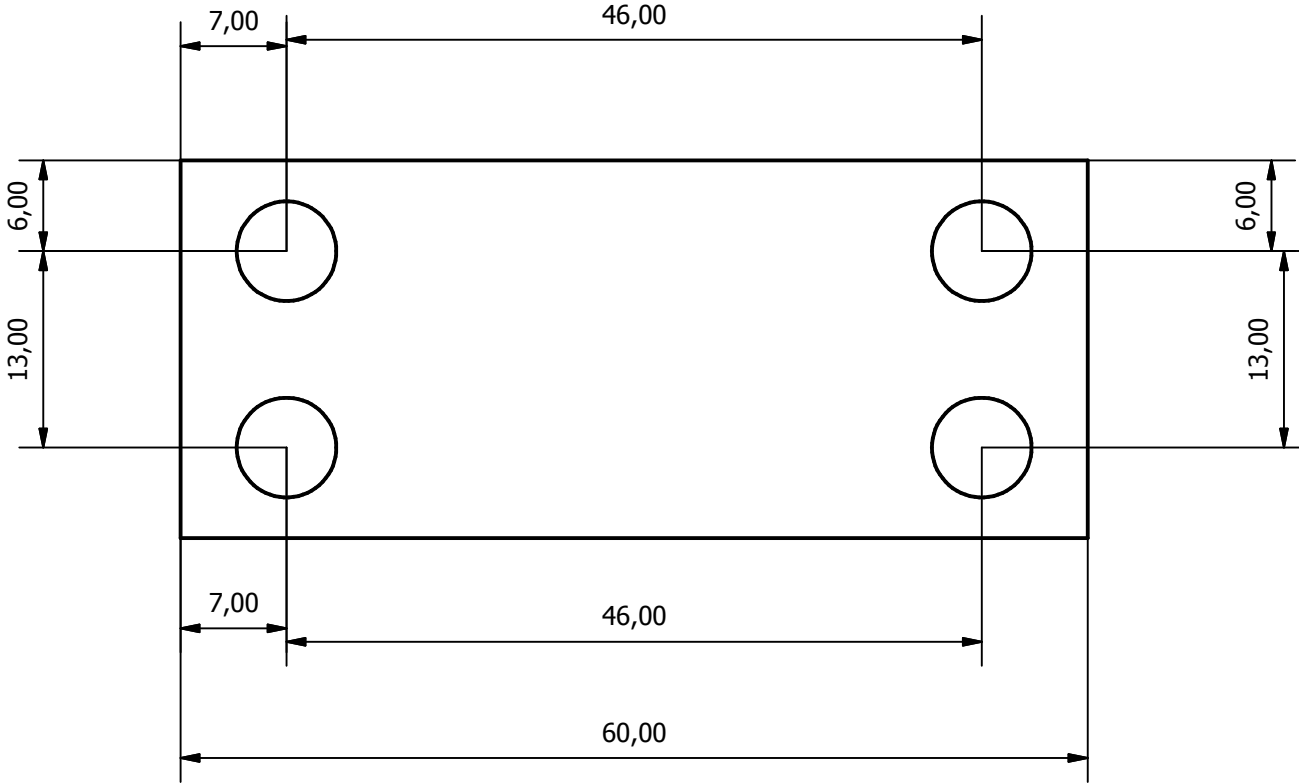




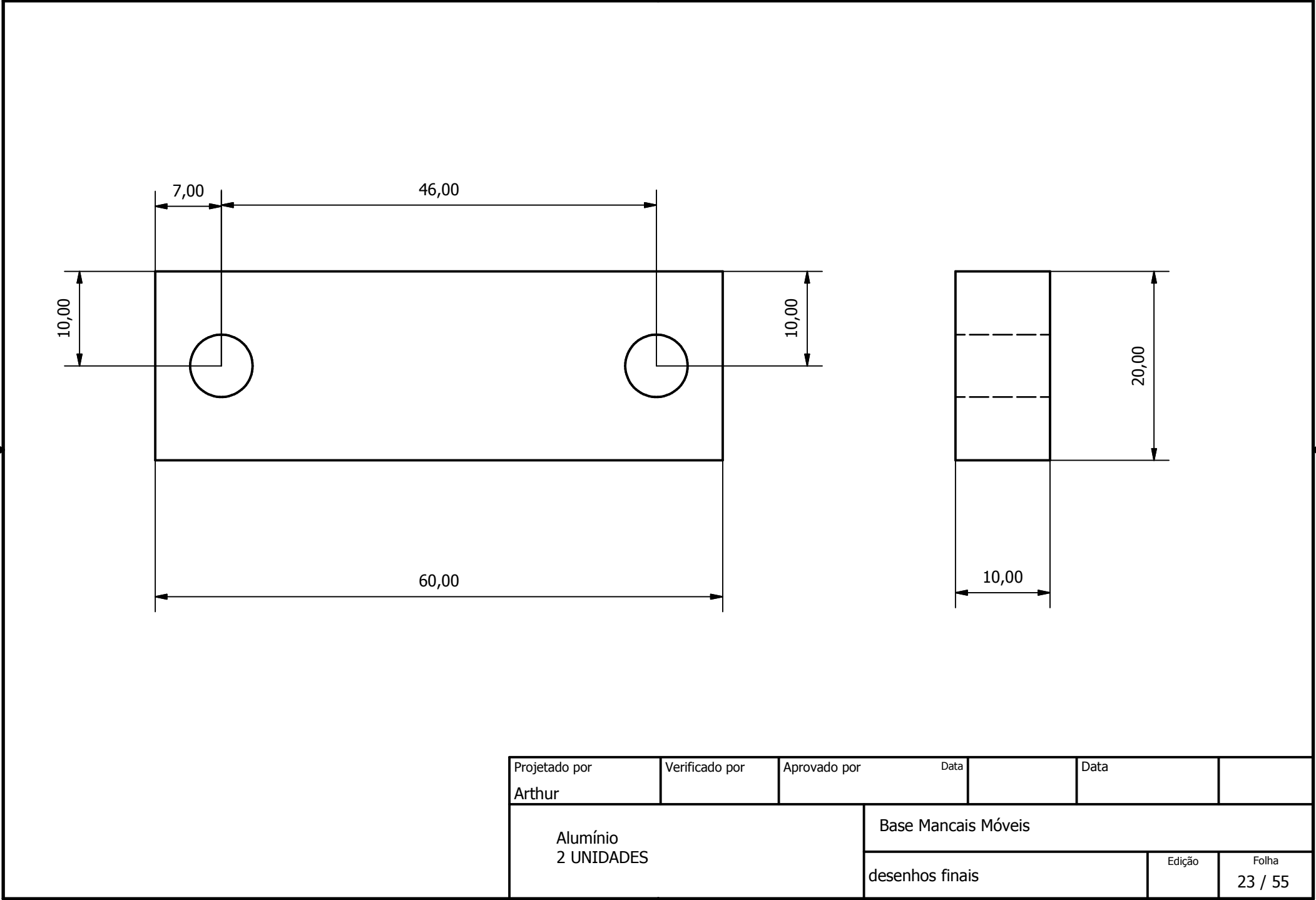


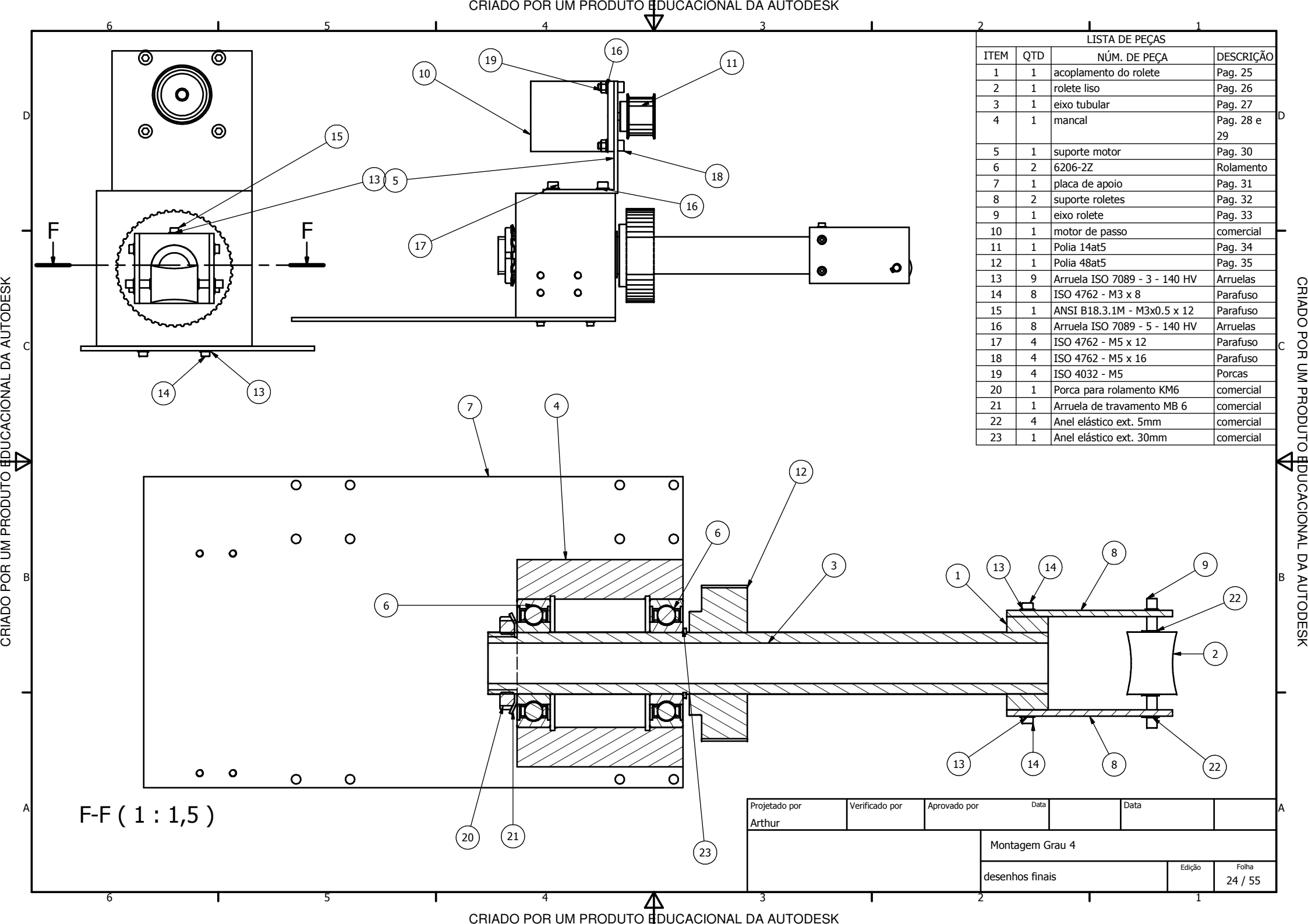


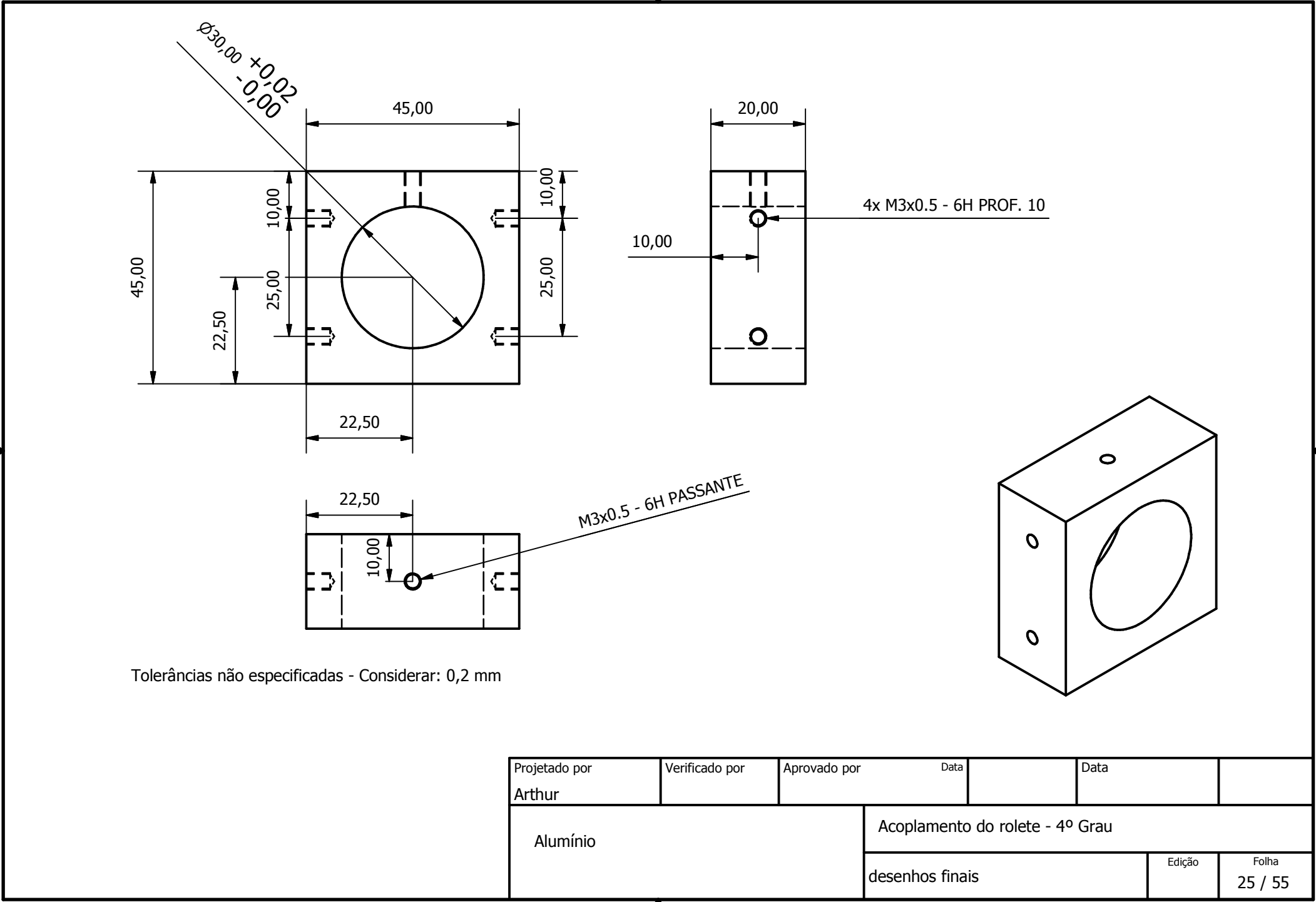
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data
Arthur				
Alumínio				
		desenhos finais	Edição	Folha
				21 / 55

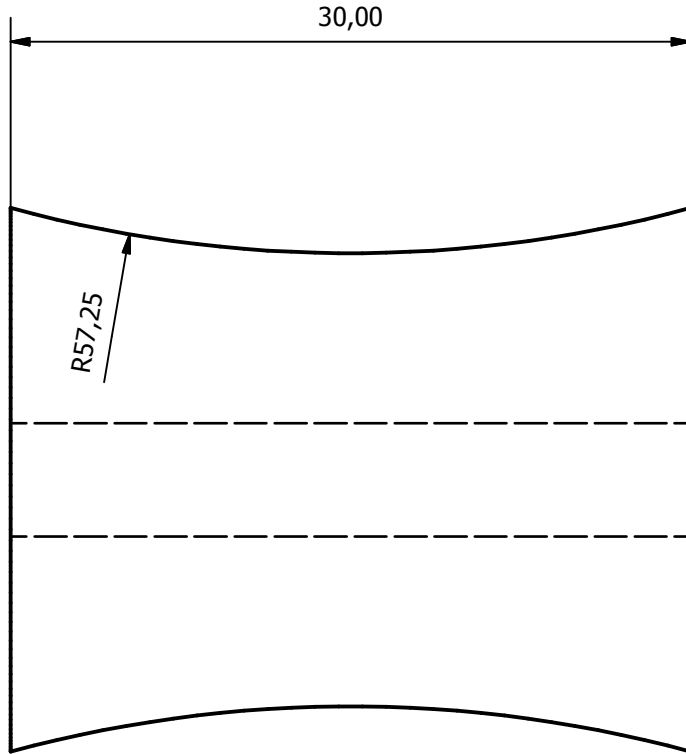
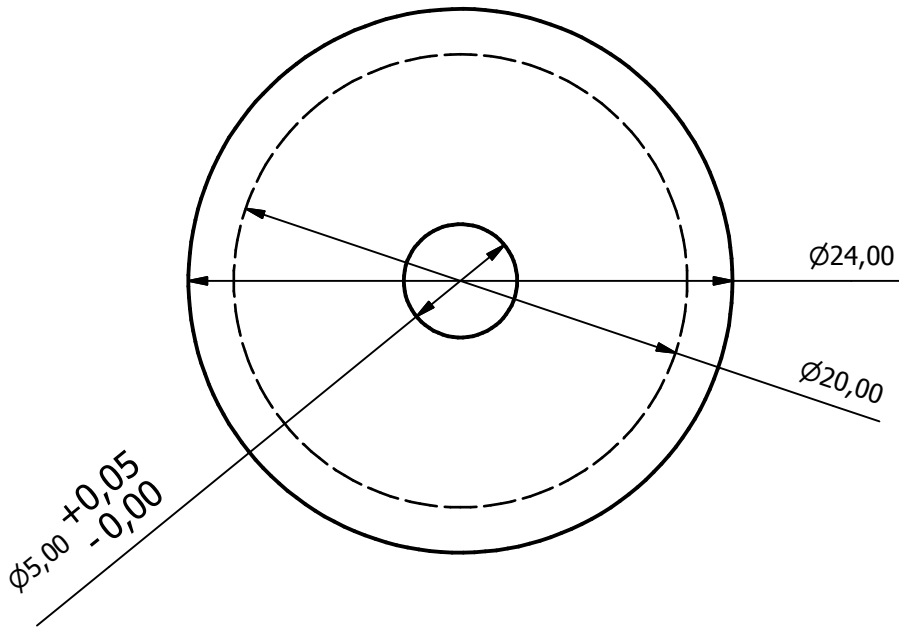


Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
Alumínio			Base Mancais Fixos			
2 UNIDADES			desenhos finais		Edição	Folha
						22 / 55



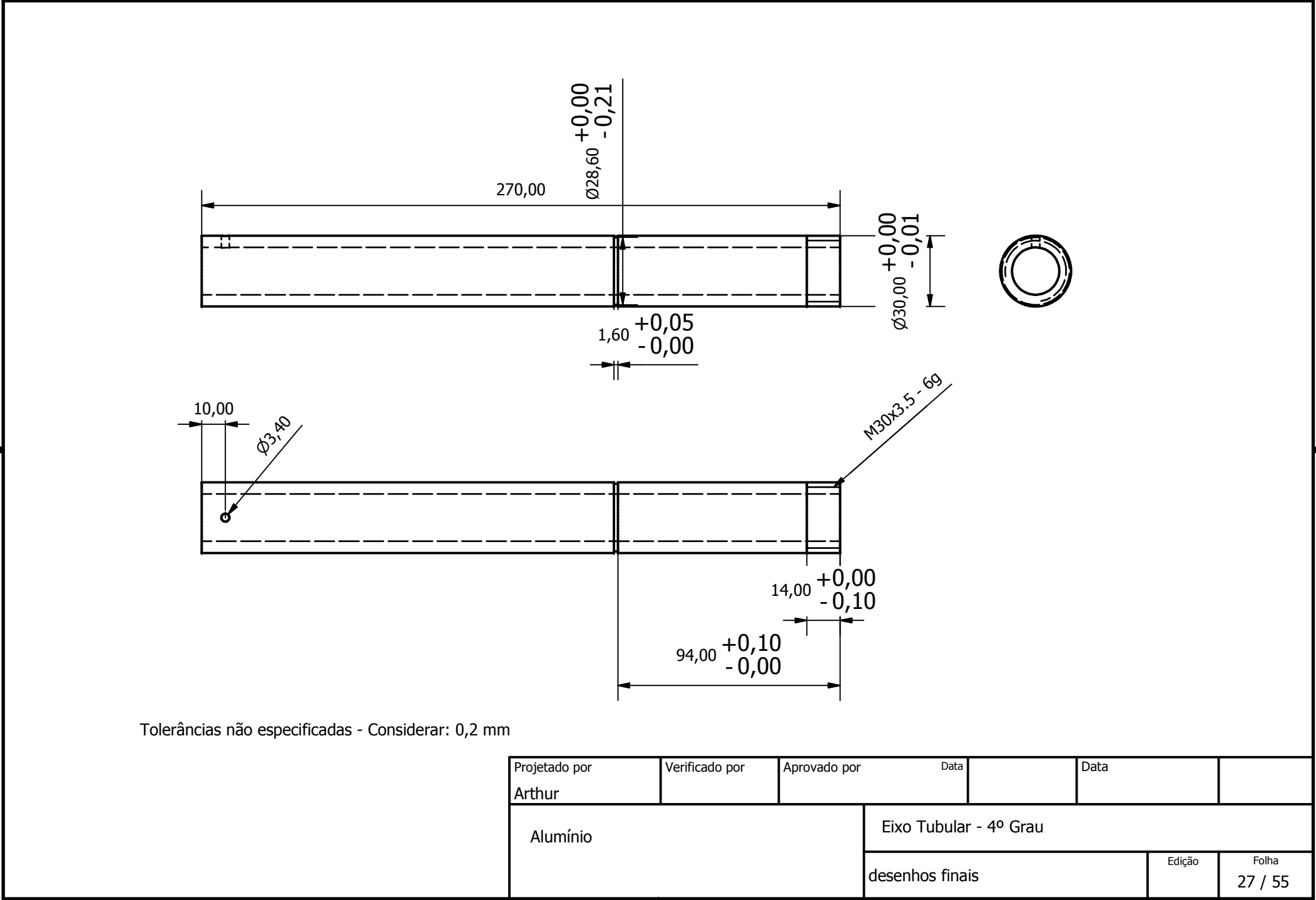


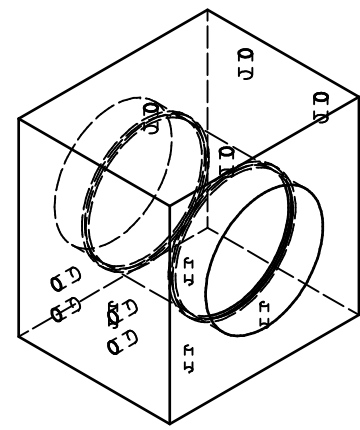
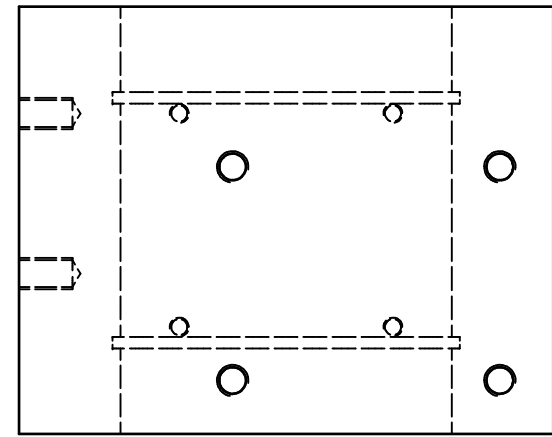
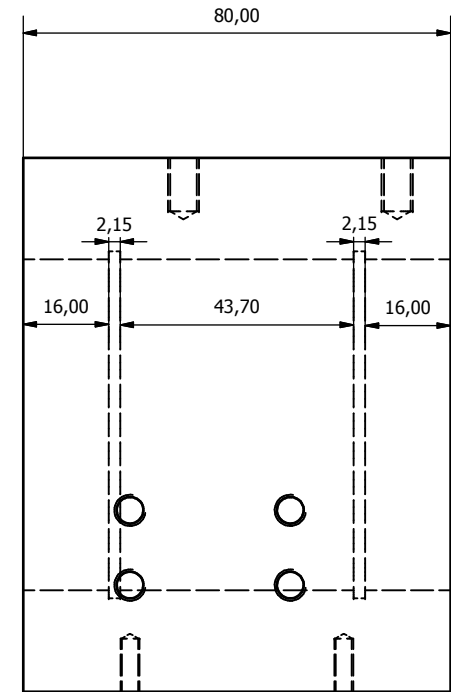
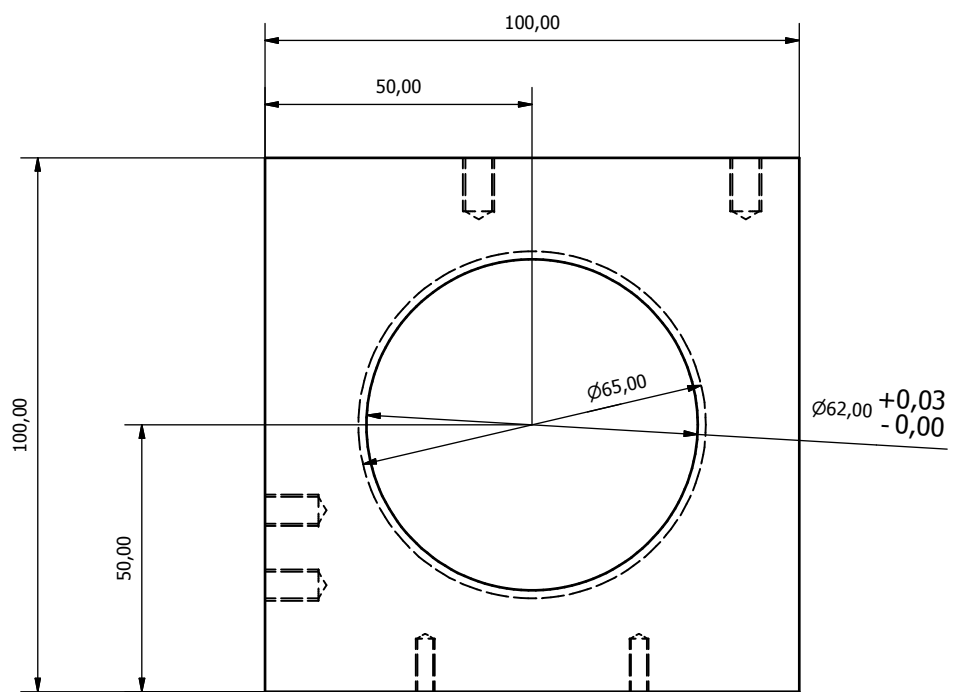




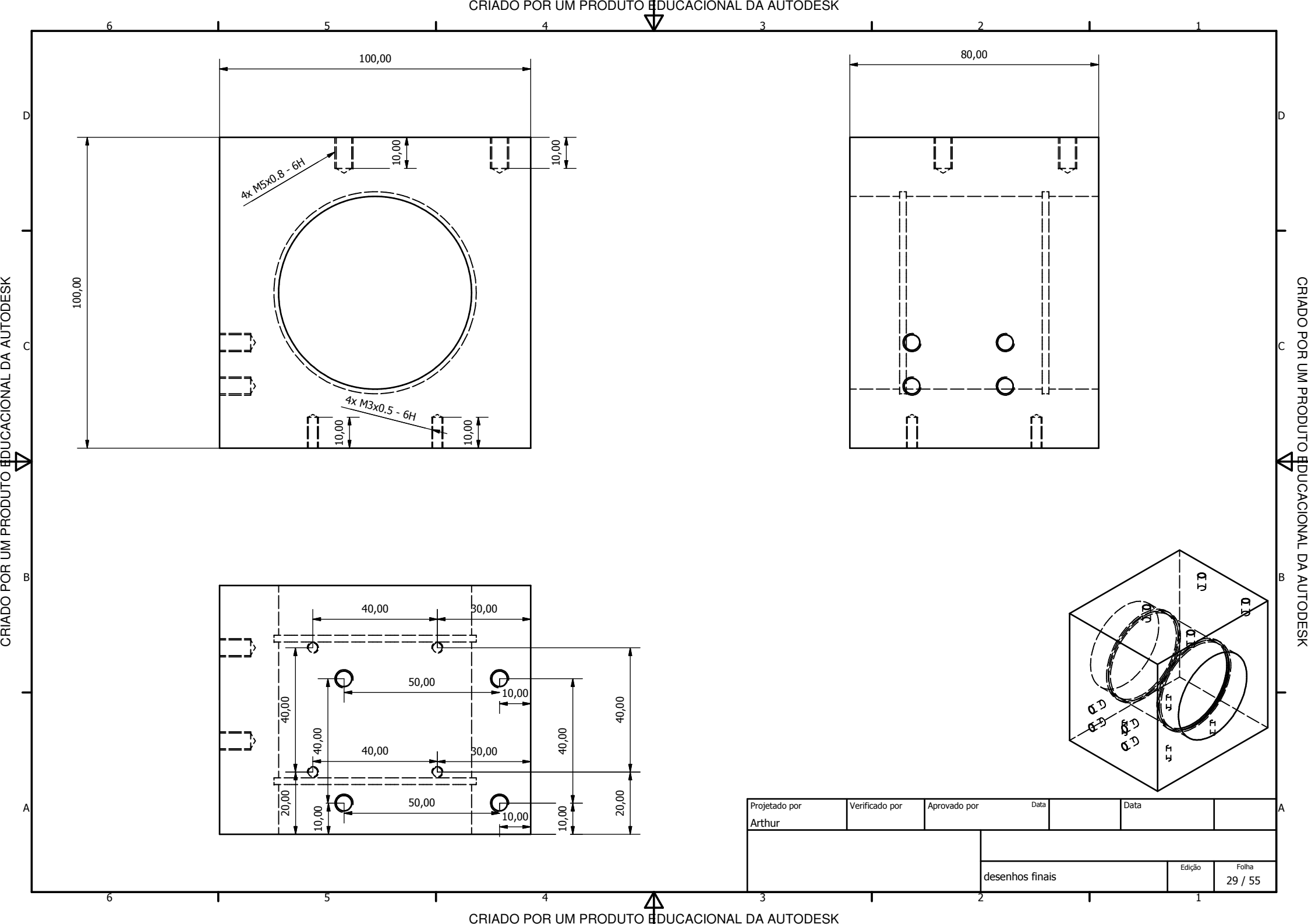
Tolerâncias não especificadas - Considerar: 0,2 mm

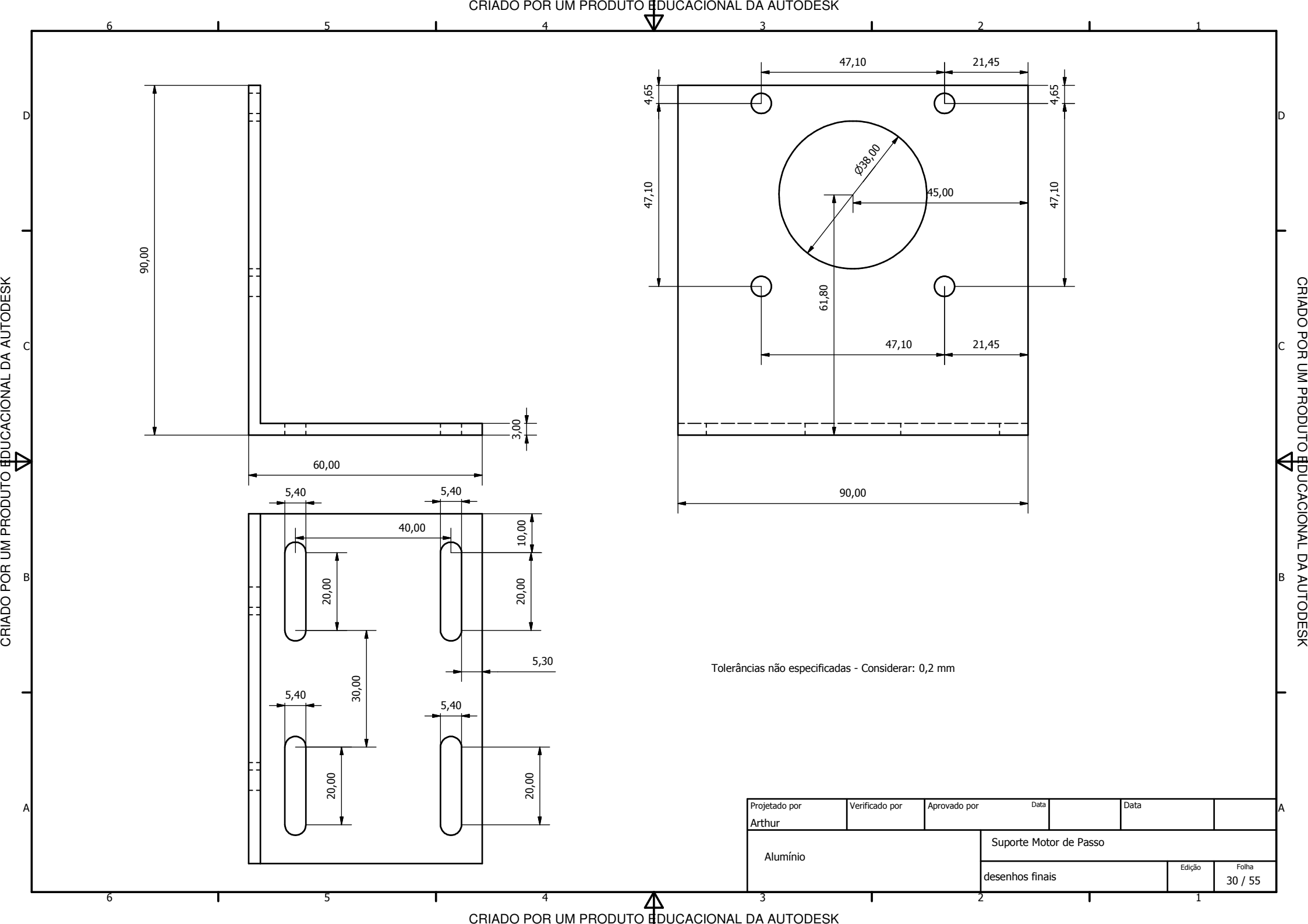
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
Alumínio			Roleta liso - 4º Grau			
			desenhos finais		Edição	Folha
						26 / 55

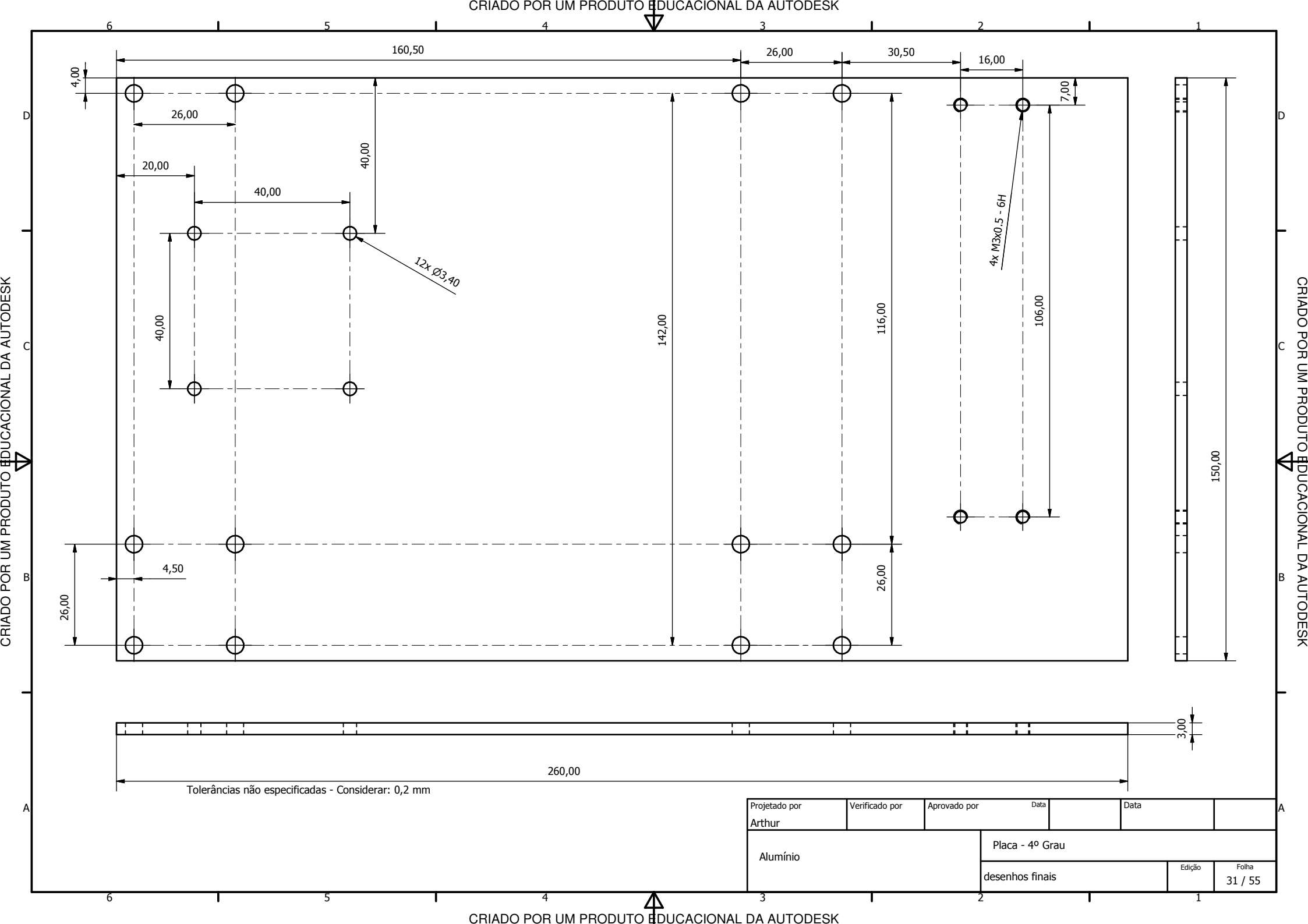


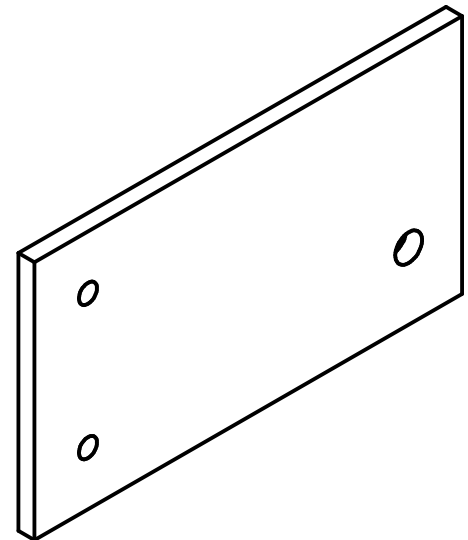
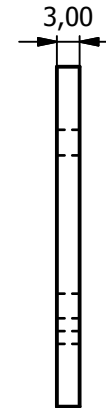
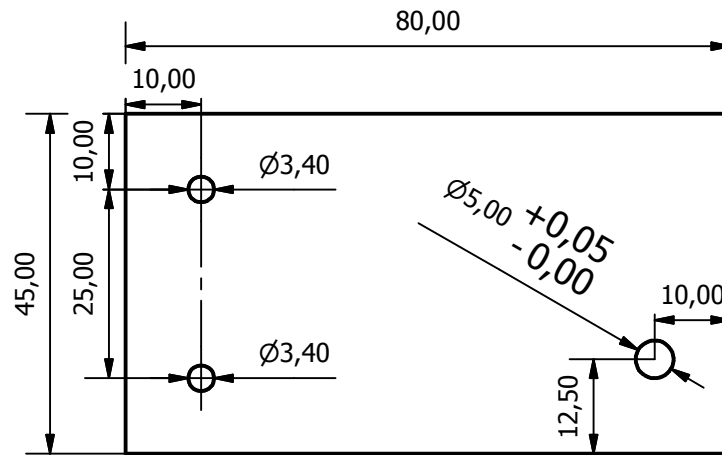


Projetado por Arthur	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Alumínio		Mancal - 4º Grau				
desenhos finais					Edição	Folha
						28 / 55



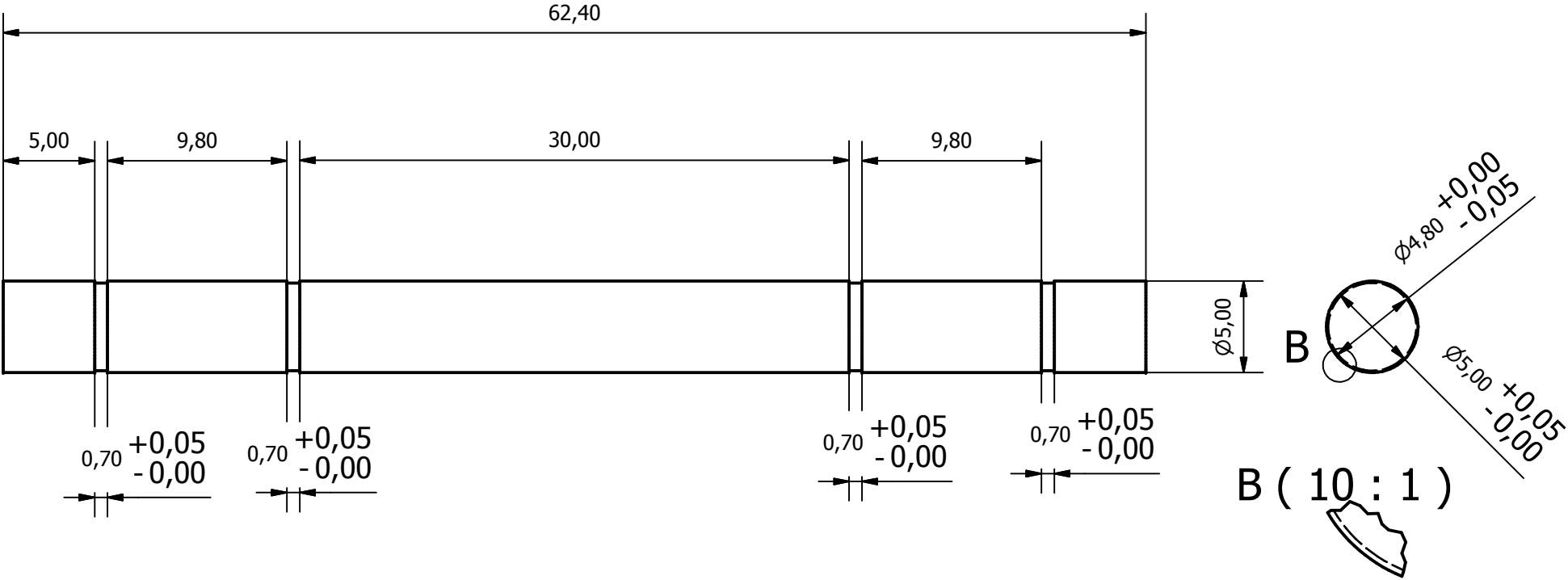






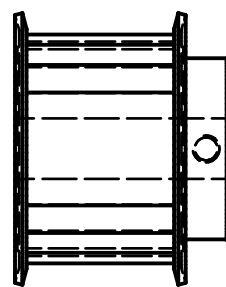
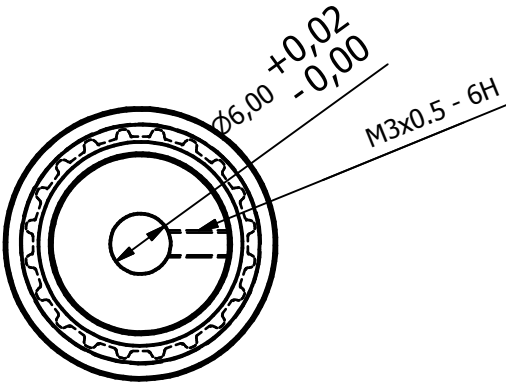
Tolerâncias não especificadas - Considerar: 0,2 mm

Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
Alumínio			Suporte Rolete - 4º Grau - 2 unidades			
			desenhos finais		Edição	Folha
						32 / 55

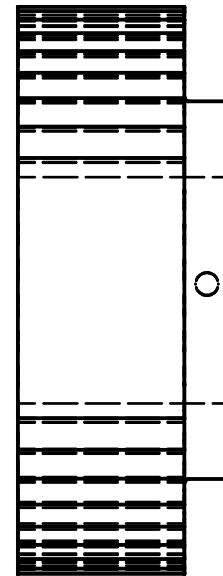
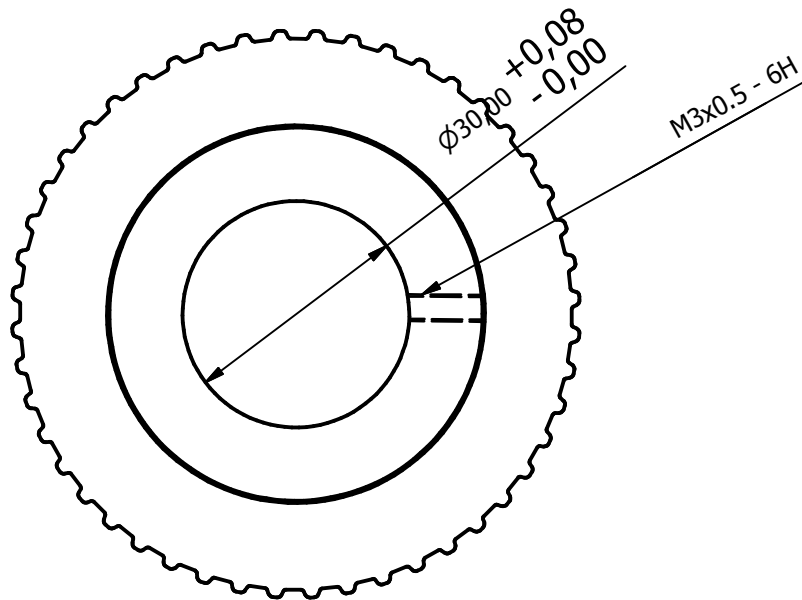


Tolerâncias não especificadas - Considerar: 0,2 mm

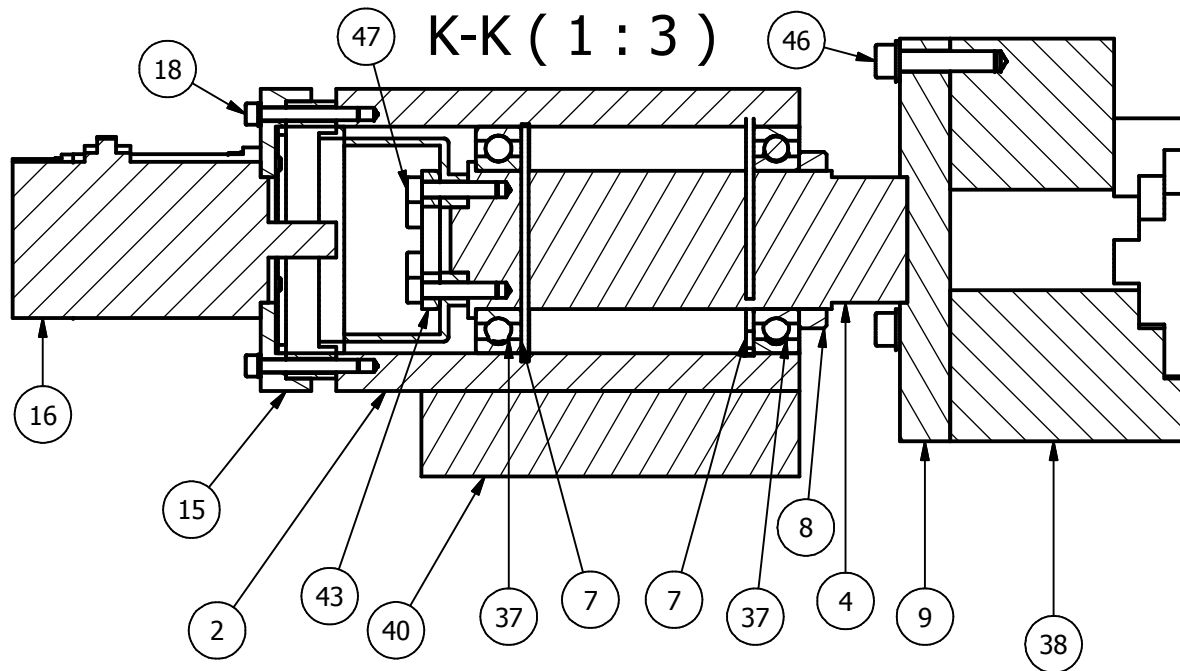
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Arthur					
Alumínio		Eixo do Rolete - 4º Grau			
		desenhos finais	Edição	Folha	
				33 / 55	



Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
Alumínio			Polia menor			
			desenhos finais		Edição	Folha
						34 / 55

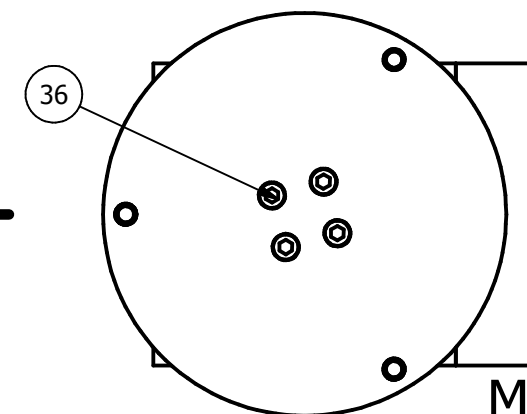
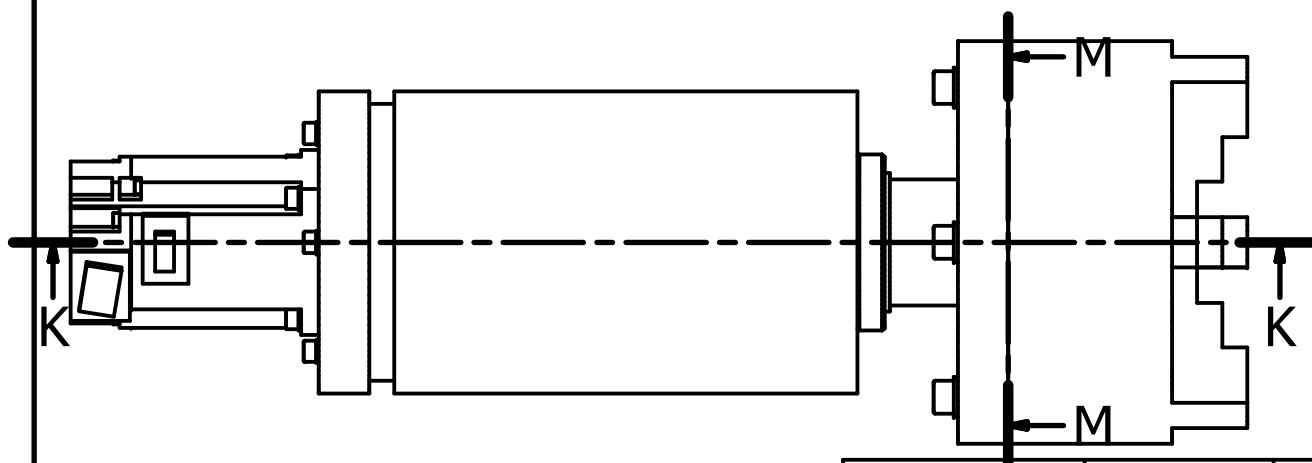


Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Arthur					
Alumínio		Polia maior			
		desenhos finais		Edição	Folha
					35 / 55



K-K (1 : 3)

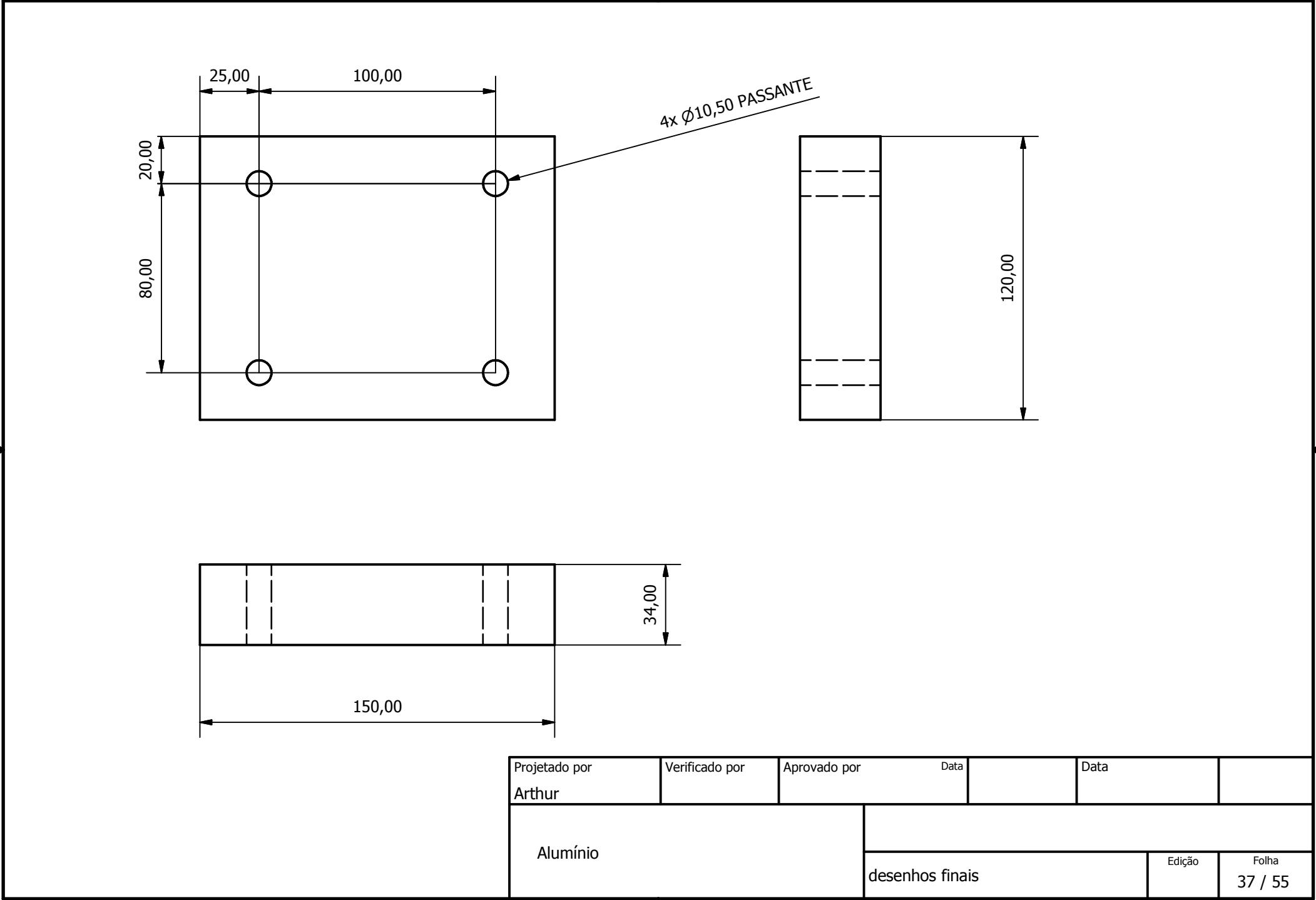
ITEM	QTD	NÚM. DE PEÇA	DESCRIÇÃO
2	1	mancal1	Pag. 39
3	1	Harmonic Drive	comercial
4	1	eixo1 acionamento	Pag. 40
7	2	DIN 472 - 90 x 3	Anel elast.
8	1	porca eixo acionamento	comercial
9	1	flange da placa	Pag. 41
15	1	tampa acop motor harm. drive	Pag. 42
16	1	HF-KP43_B_IF0001	comercial
17	10	DIN 433 - 5,3	Arruela
18	6	DIN 912 - M5 x 40	Parafuso
19	4	DIN 912 - M5 x 16	Parafuso
36	4	DIN 912 - M6 x 25	Parafuso
37	2	6011	Rolamento
38	1	placa de torno	comercial
40	1	apoio acionamento	Pag. 37
43	1	flange interna HD	Pag. 38
45	3	ISO 7089 - 8 - 140 HV	Arruelas
46	3	Unbrako - M8 x 40	Parafuso
47	6	ISO 4762 - M6 x 30	Parafuso



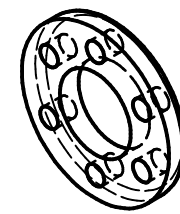
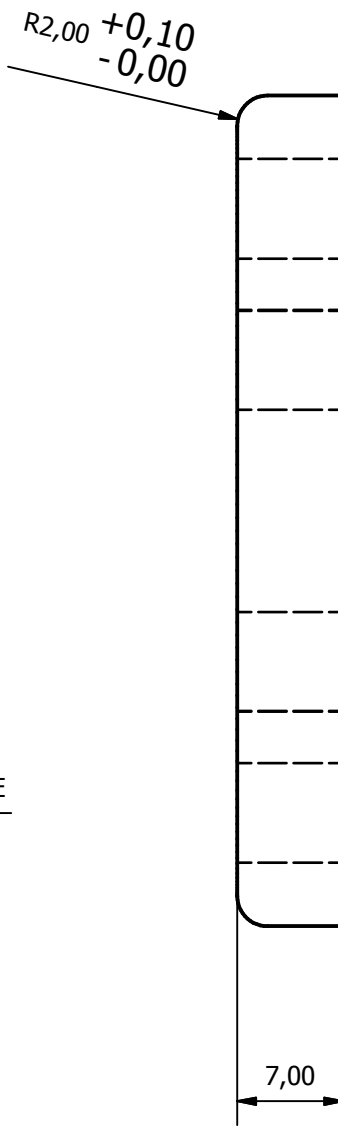
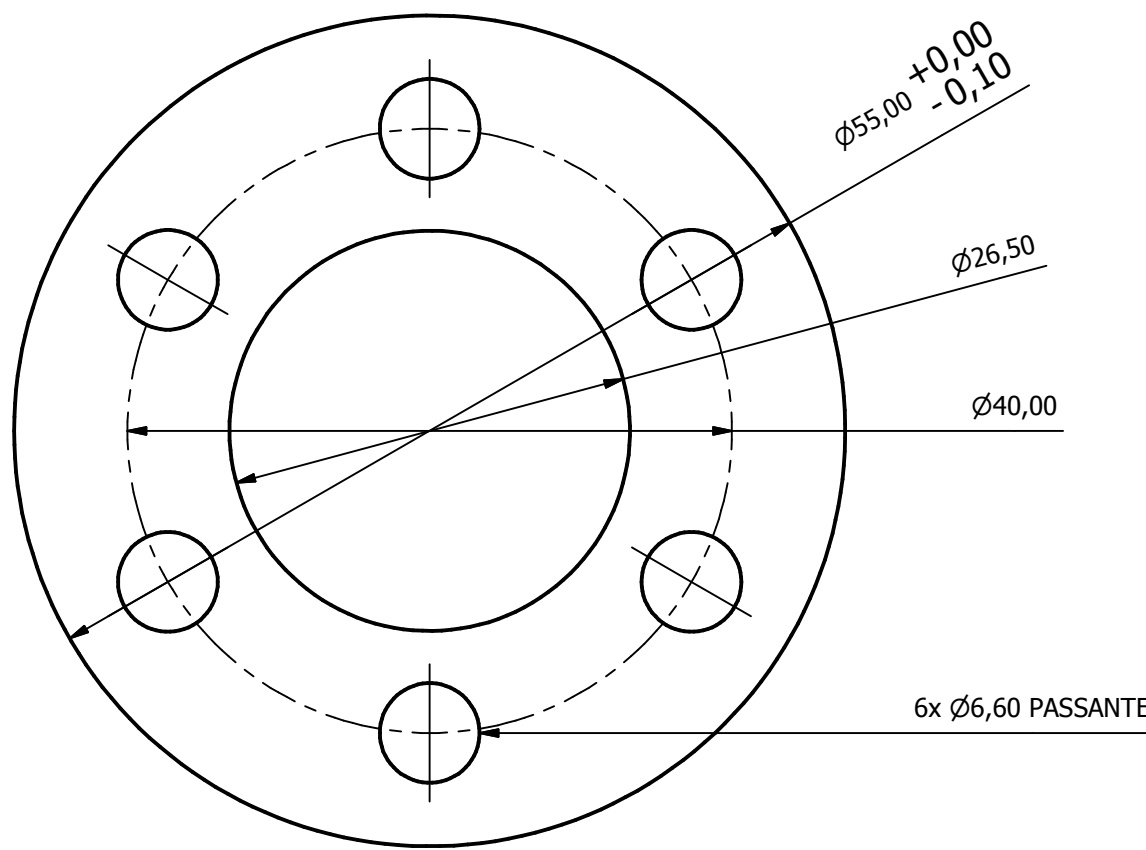
M-M (1 : 3)

Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Arthur					
			Acionamento - Montagem		
			desenhos finais	Edição	Folha
					36 / 55

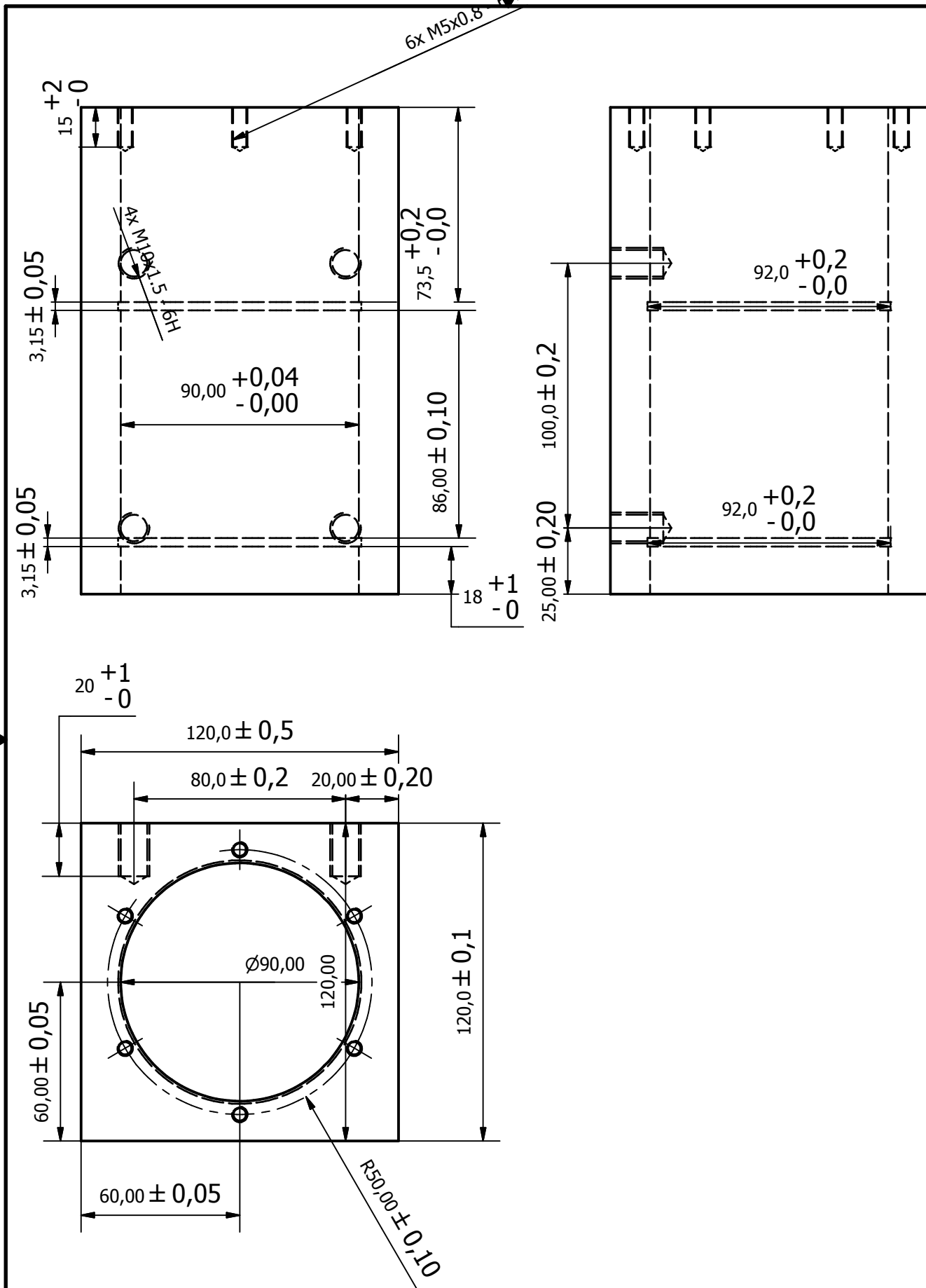




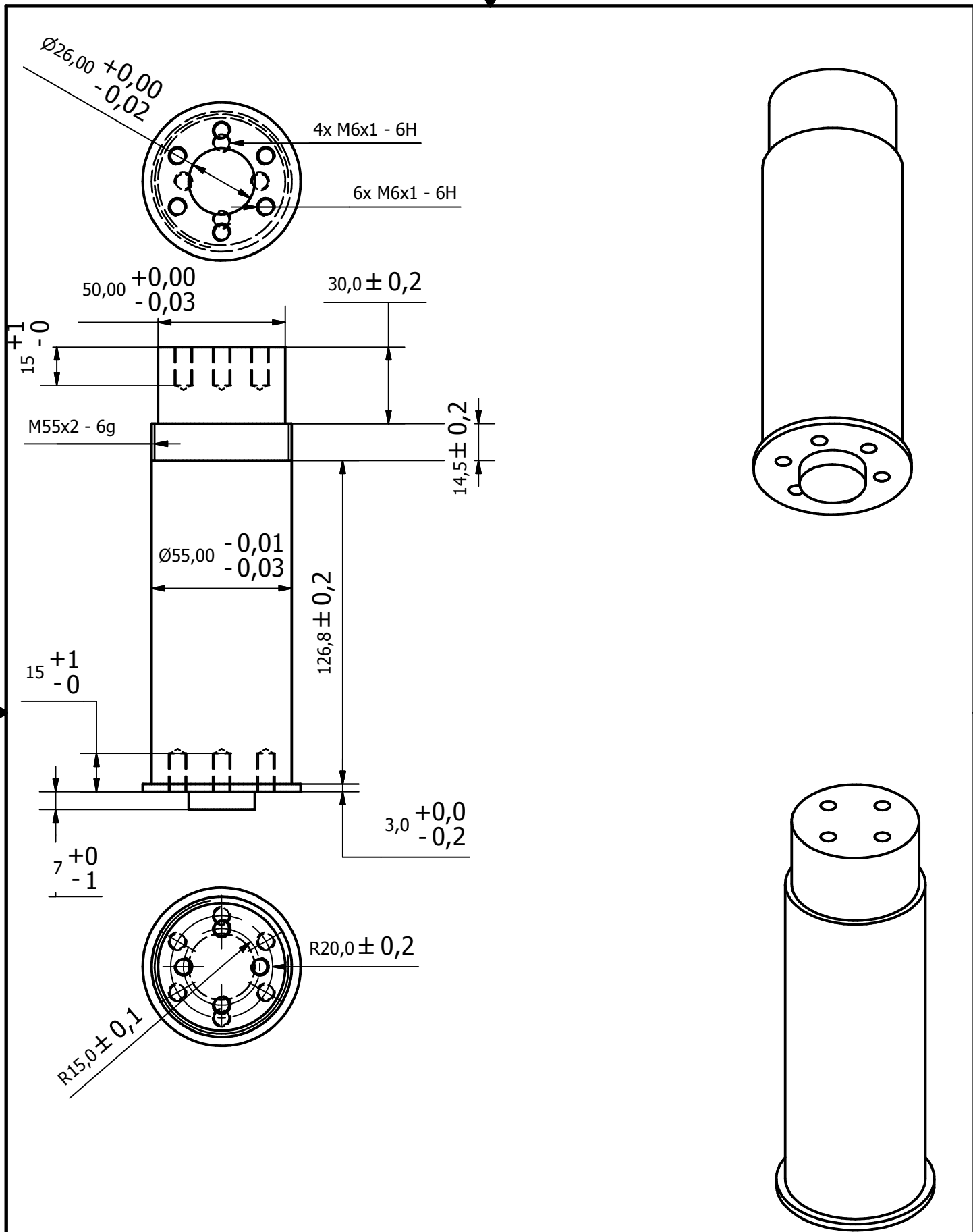
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
Alumínio						
			desenhos finais		Edição	Folha
						37 / 55



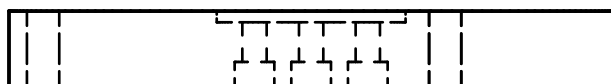
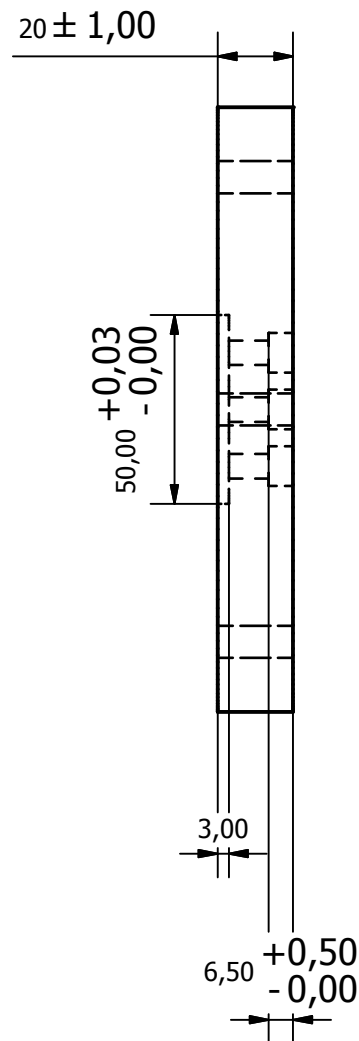
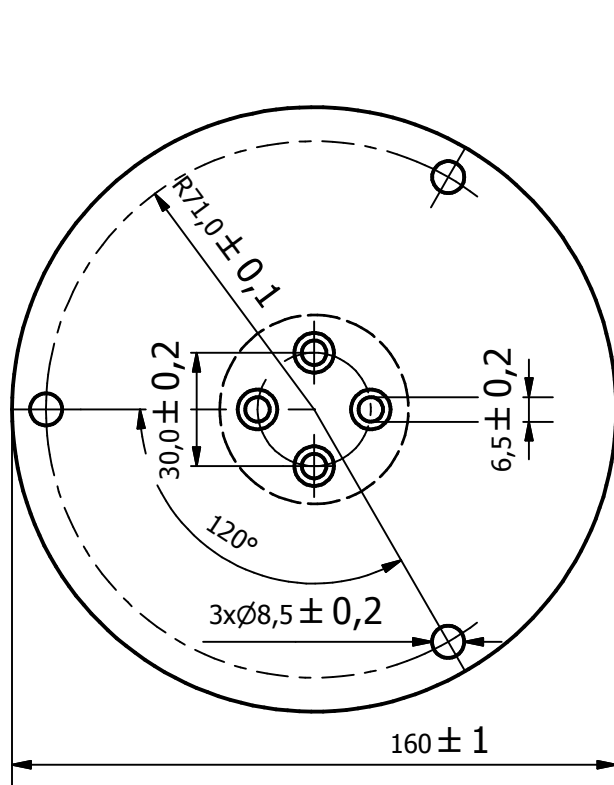
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
			desenhos finais		Edição	Folha
						38 / 55



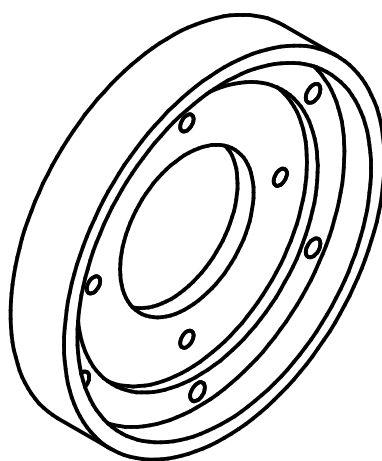
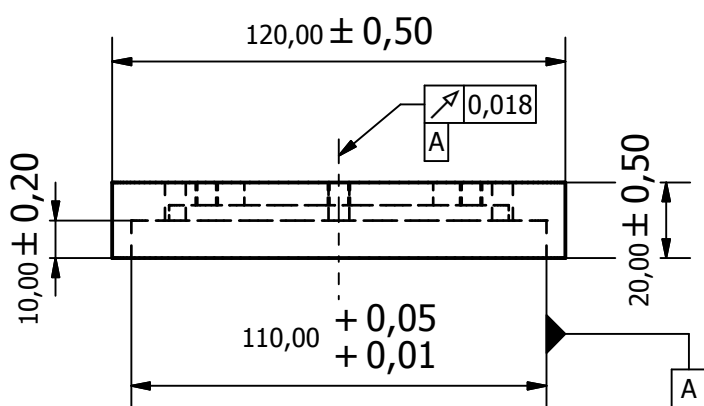
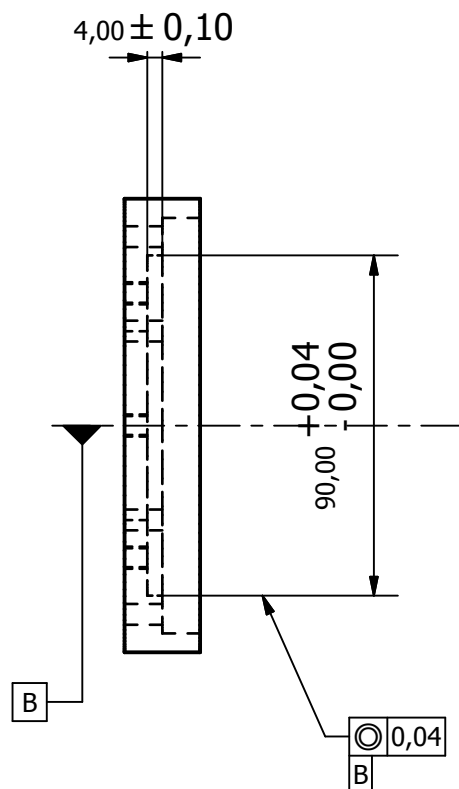
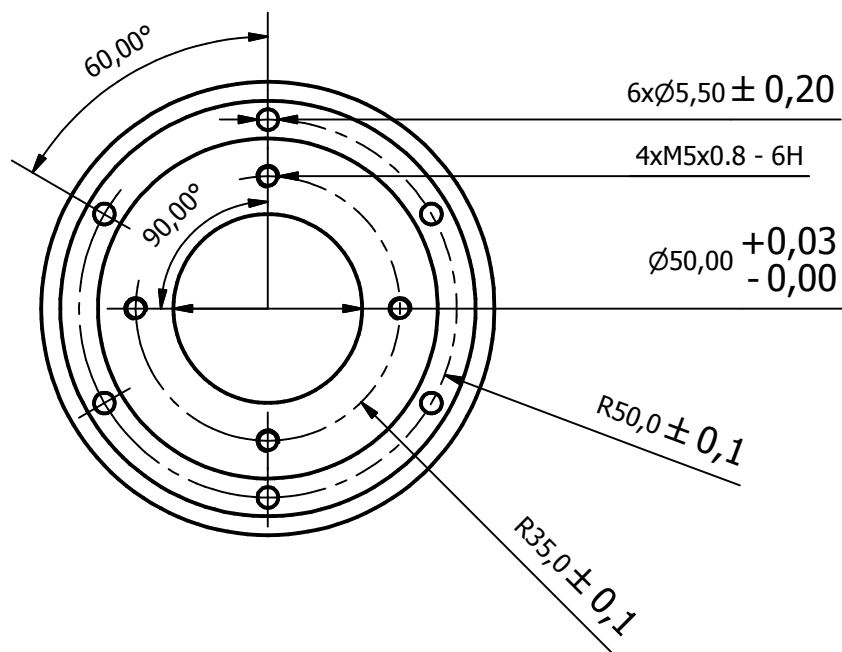
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Arthur					
Alumínio			Mancal - Acionamento		
			desenhos finais	Edição	Folha
					39 / 55



Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Arthur					
Aço		Eixo - Acionamento			
		desenhos finais		Edição	Folha
					40 / 55

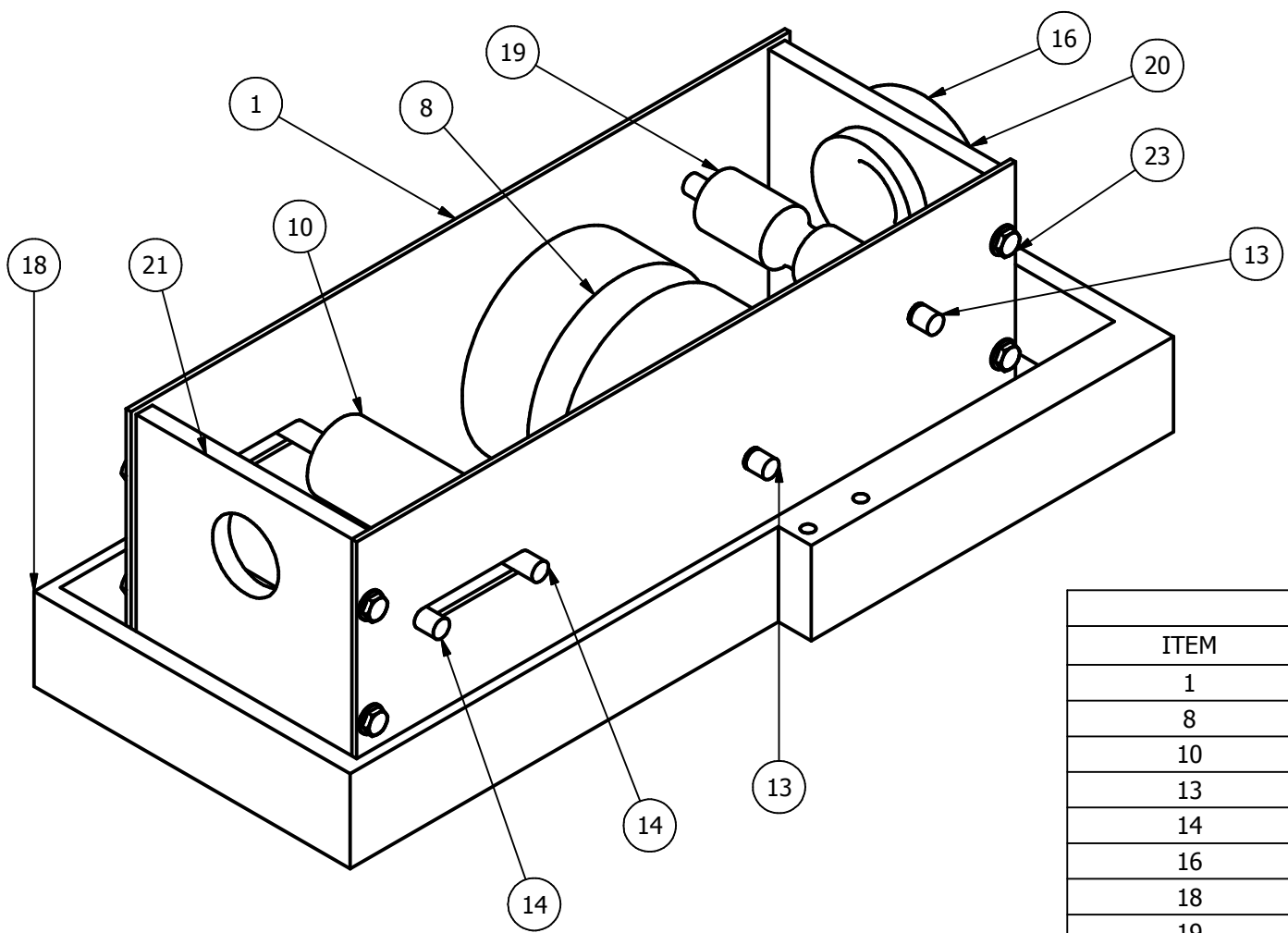


Projetado por Arthur	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Aço			Flange da Placa de 3 Cast. - Acionamento		
desenhos finais			Edição	Folha 41 / 55	



Projetado por Arthur	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Alumínio		Frente Mancal - Acionamento			
		desenhos finais		Edição	Folha 42 / 55





LISTA DE PEÇAS

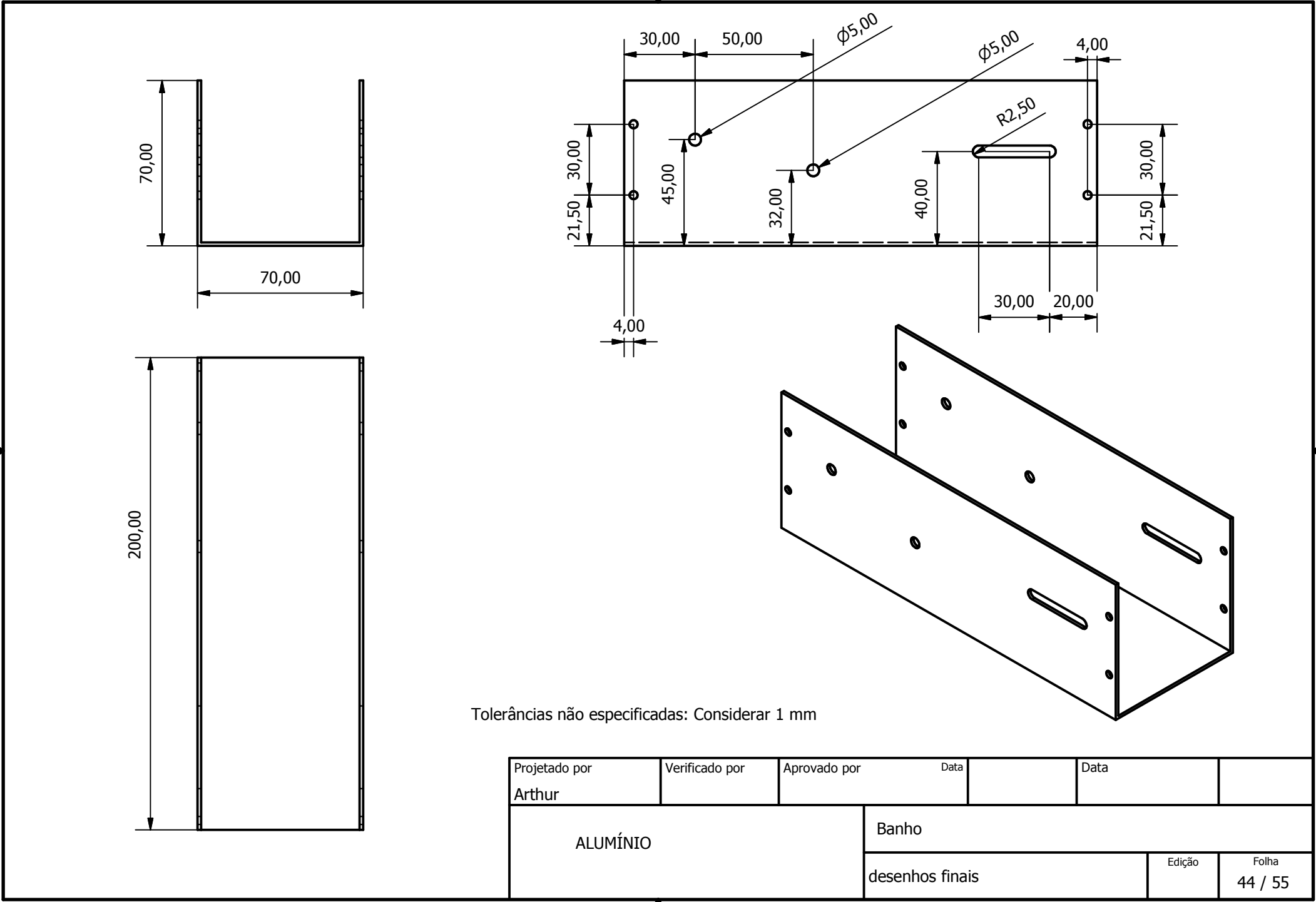
ITEM	QTD	NÚM. DE PEÇA	DESCRIÇÃO
1	1	banho	Pag. 44
8	1	rolete maior	Pag. 50
10	2	raspador	Pag. 53
13	2	eixo	Pag. 48
14	2	eixo roscado	Pag. 49
16	1	olhal	Pag. 52
18	1	bandeija	Pag. 47
19	1	rolete menor	Pag. 51
20	1	suporte 1	Pag. 45
21	1	suporte 2	Pg. 46
22	8	ISO 7089 - 3 - 140 HV	Arruelas
23	8	ISO 4017 - M3 x 10	Parafusos

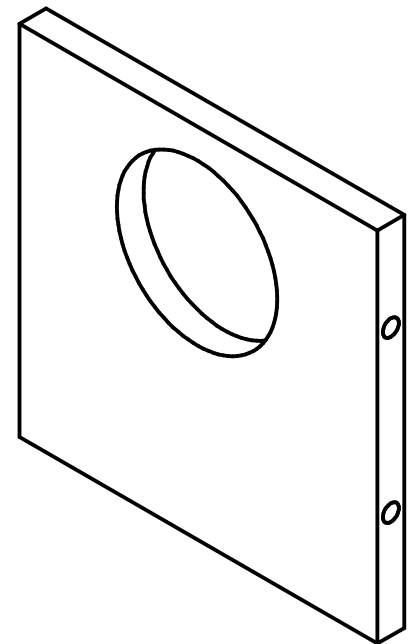
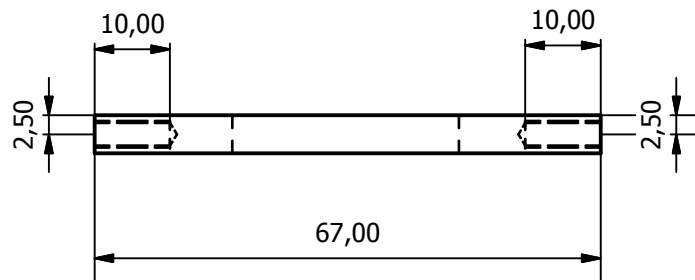
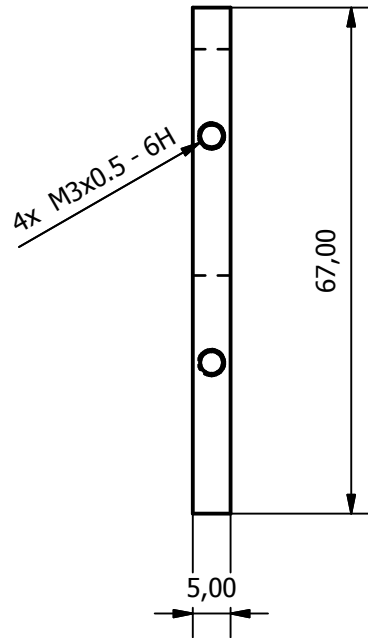
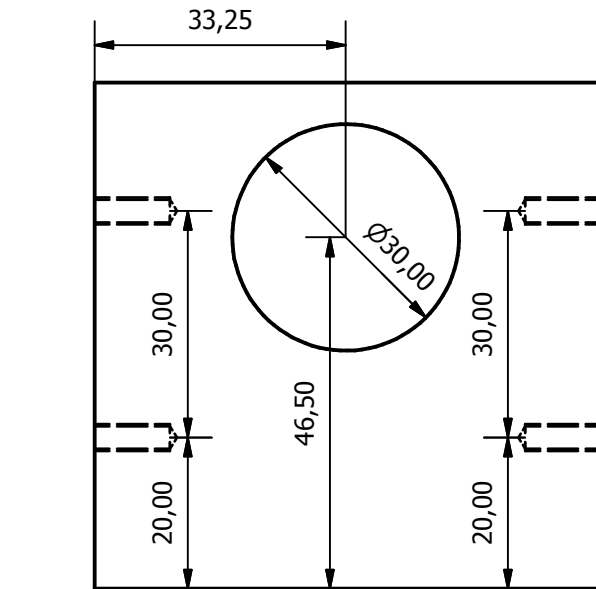
Projetado por Arthur	Verificado por	Aprovado por	Data	Data
		Montagem Banho		
		desenhos finais	Edição	Folha 43 / 55



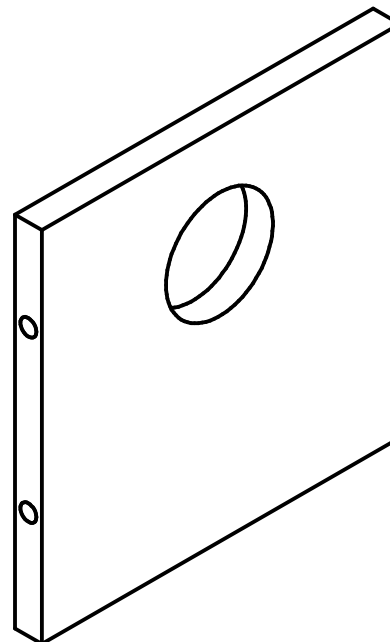
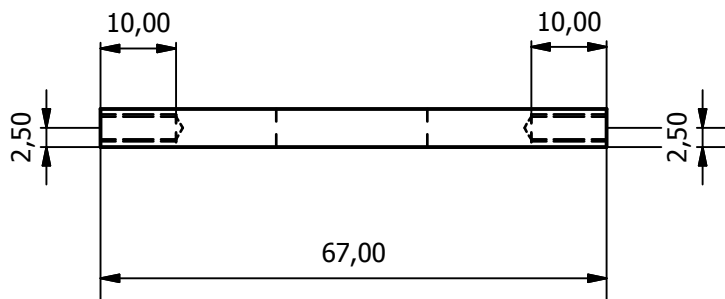
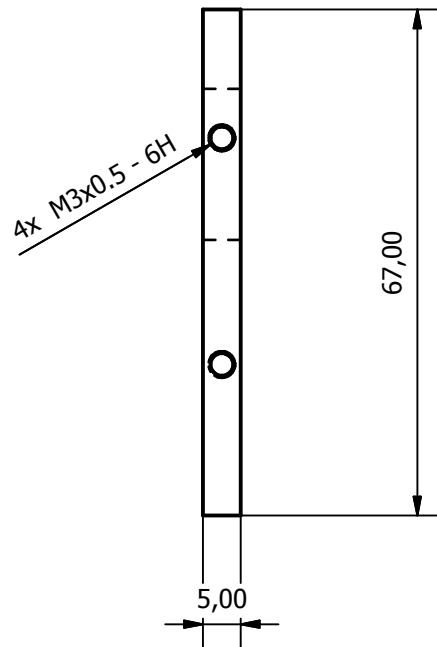
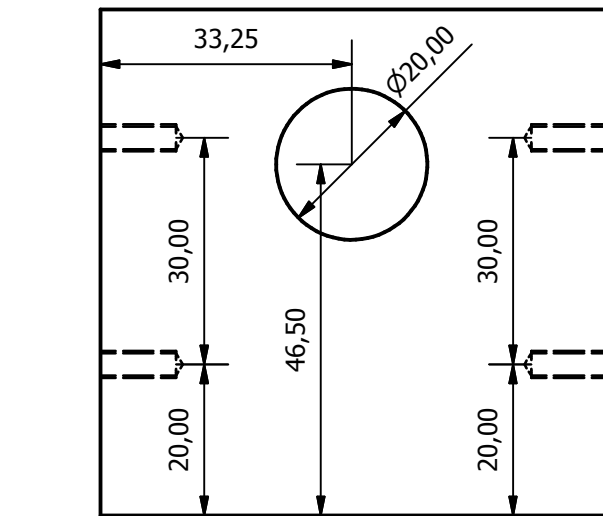
CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

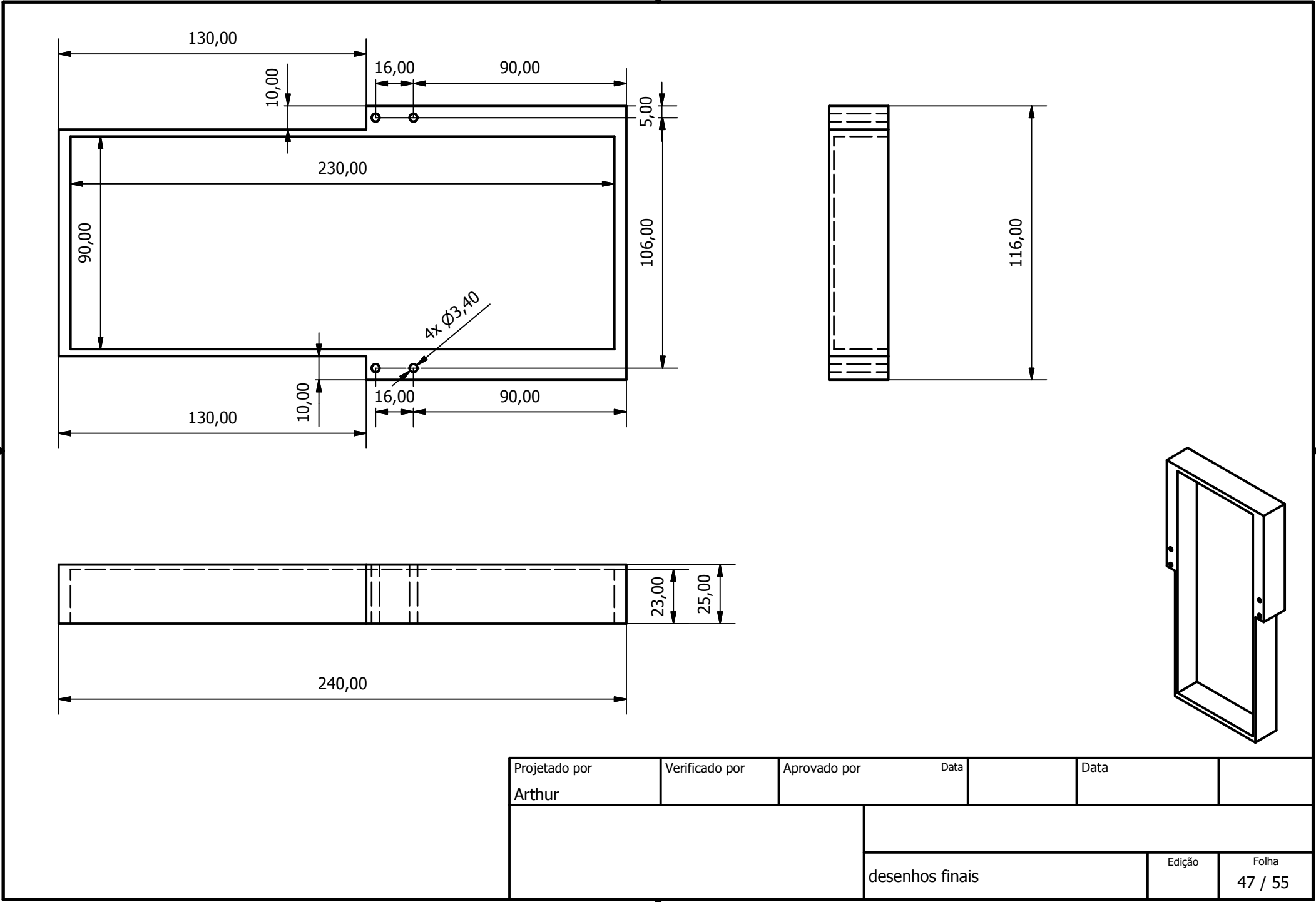




Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Arthur					
			desenhos finais	Edição	Folha
					45 / 55



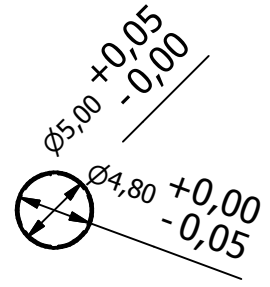
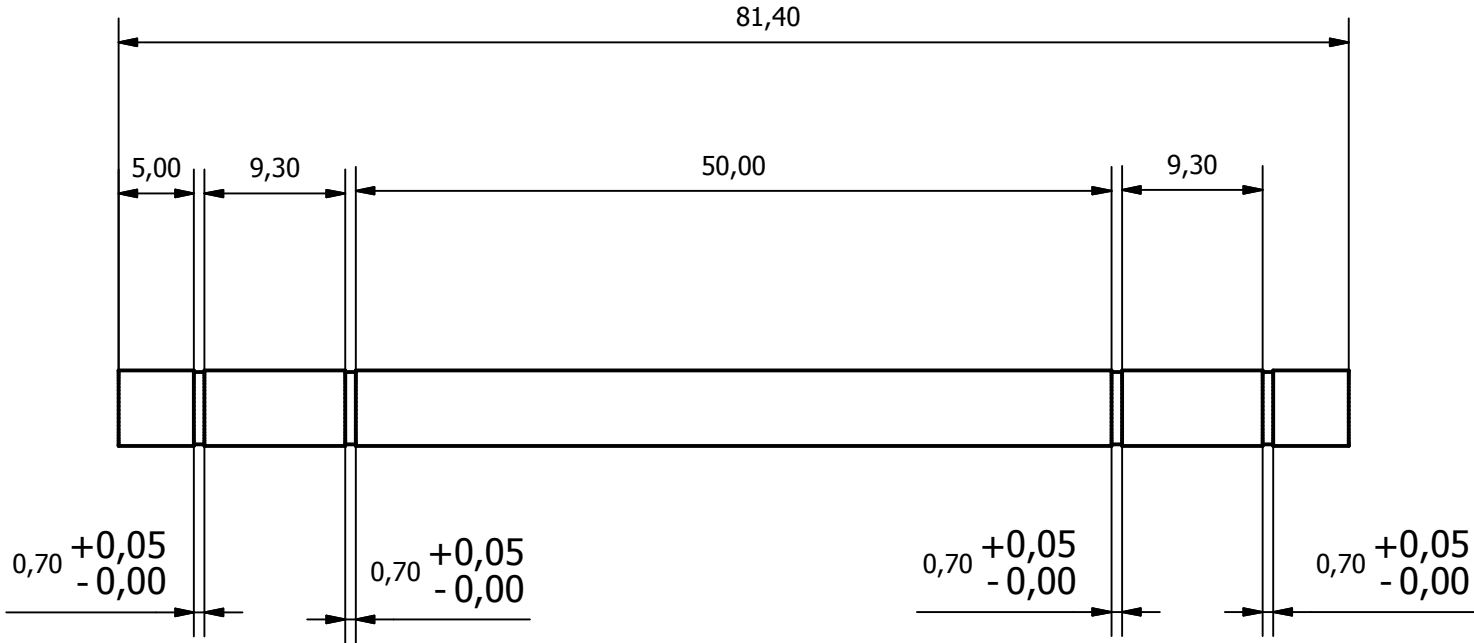
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Arthur					
			desenhos finais	Edição	Folha
					46 / 55



CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

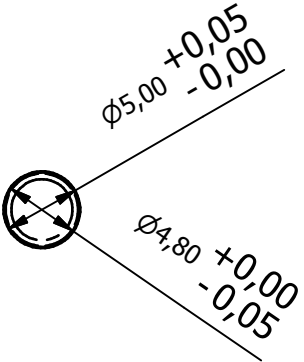
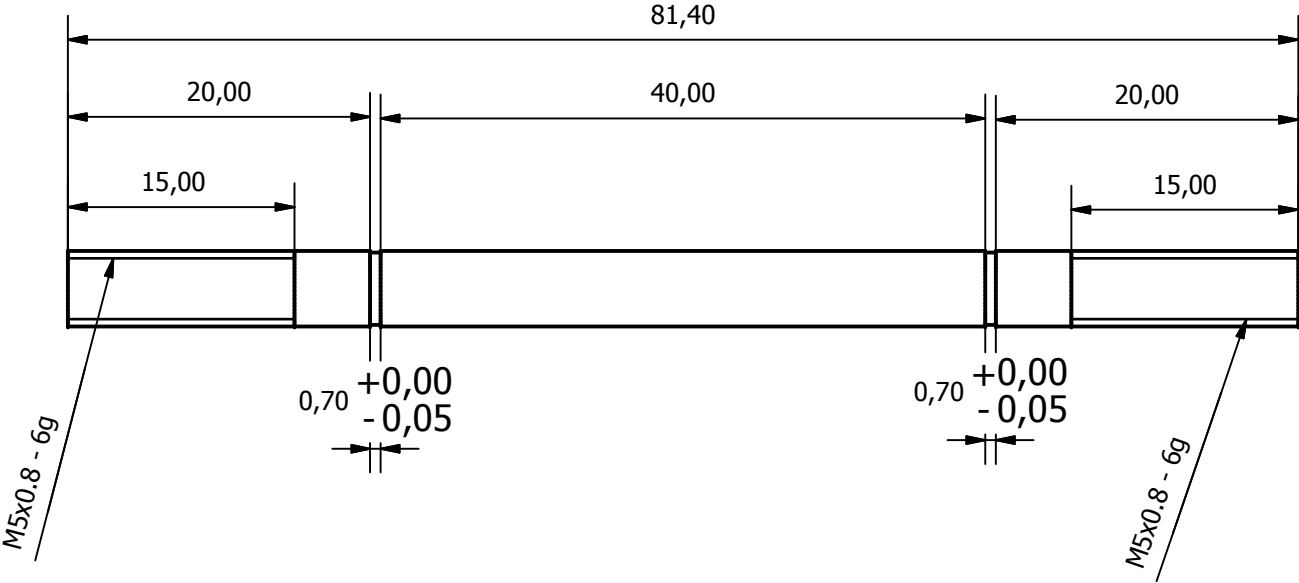
CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK

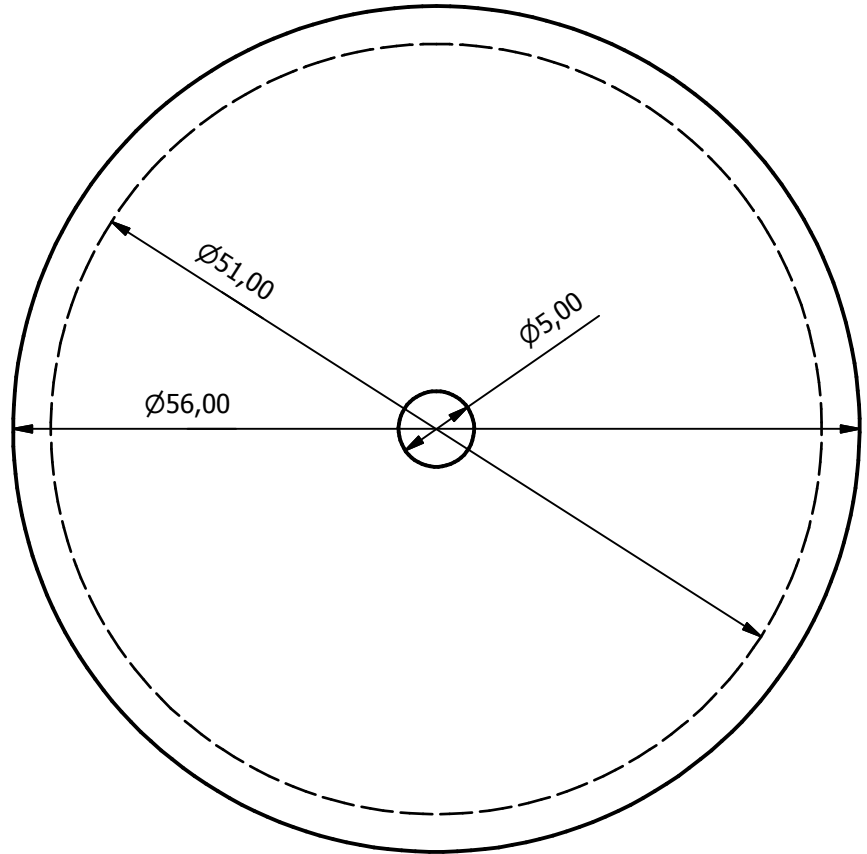
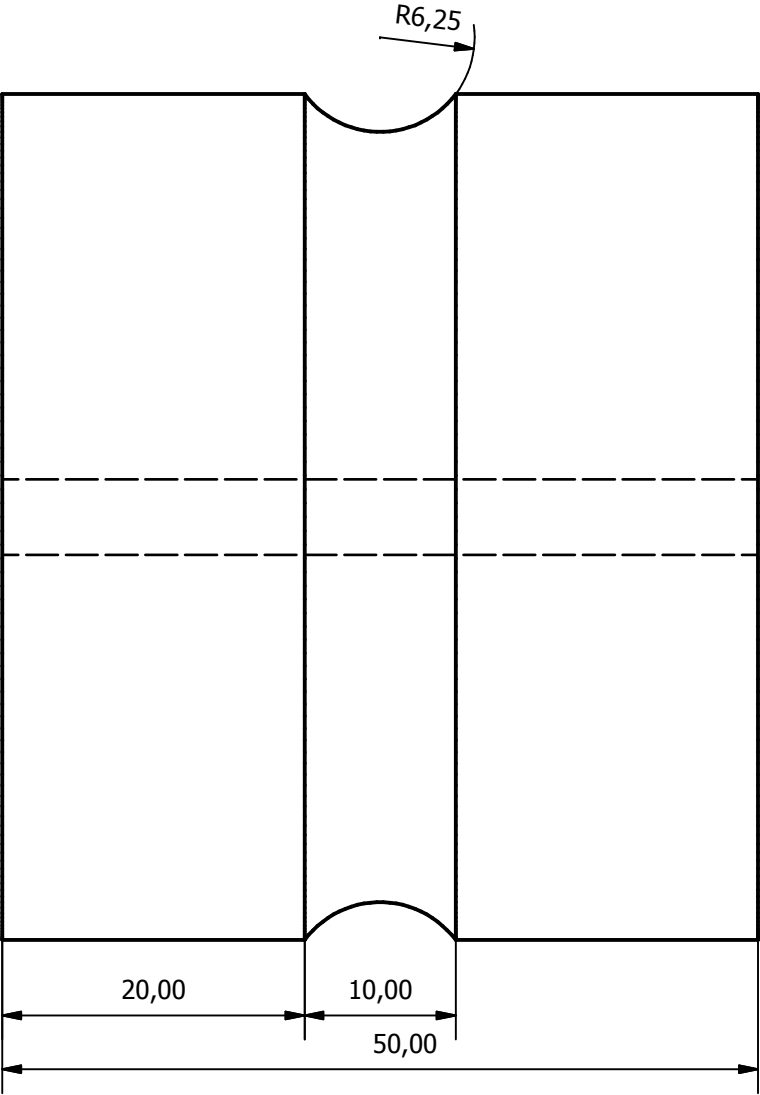


Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Arthur					
Alumínio					
2 UNIDADES	desenhos finais			Edição	Folha
					48 / 55

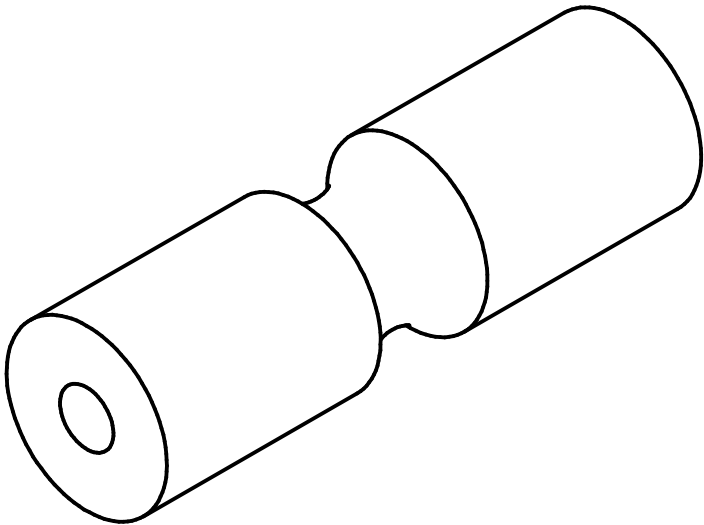
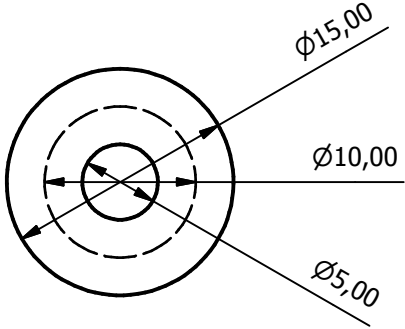
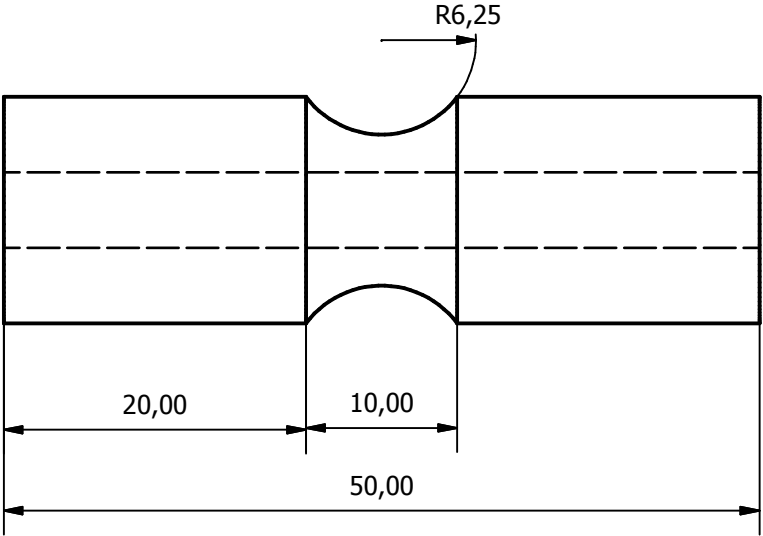
CRIADO POR UM PRODUTO EDUCACIONAL DA AUTODESK



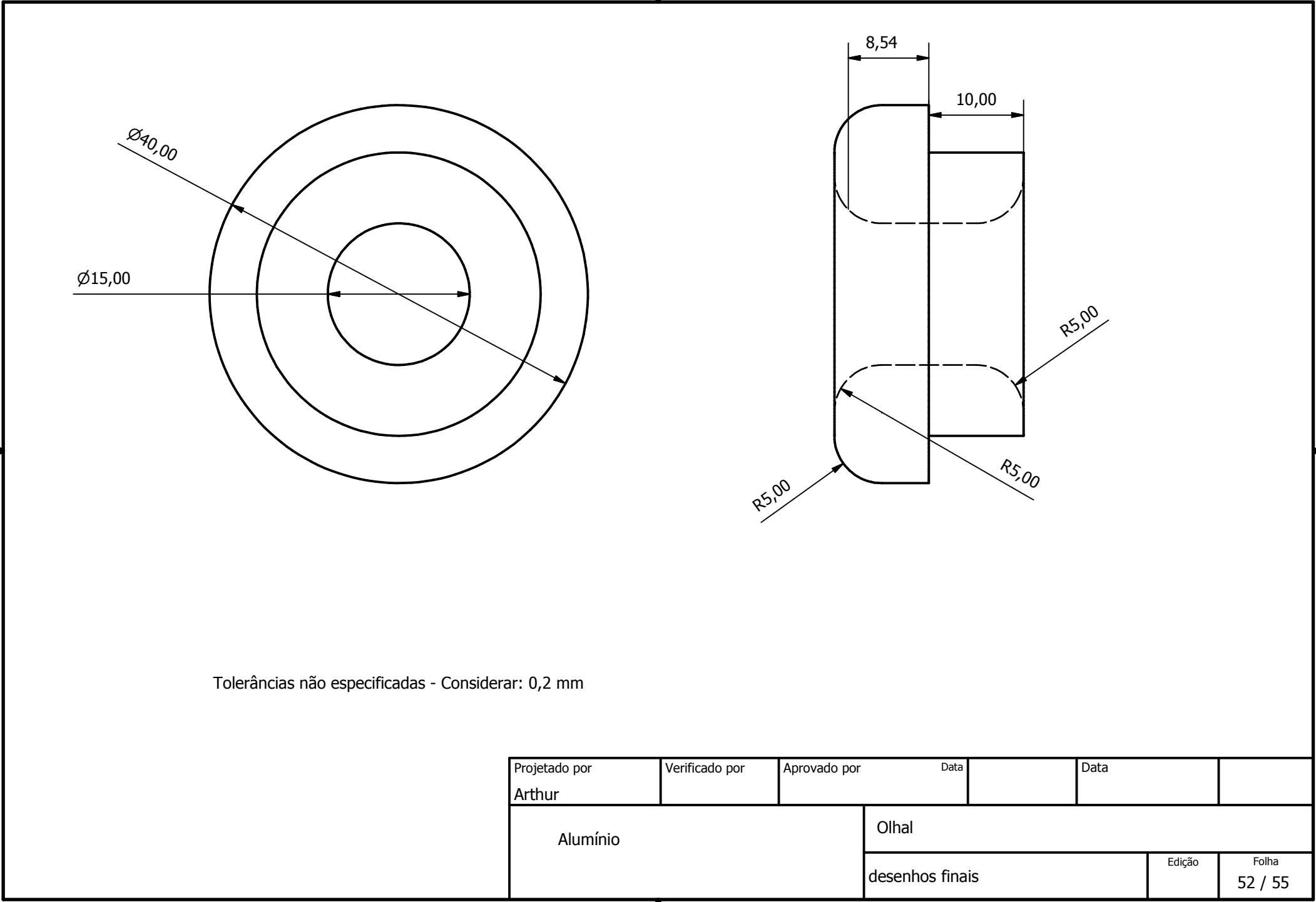
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
Arthur					
Alumínio					
2 UNIDADES					
desenhos finais				Edição	Folha
					49 / 55

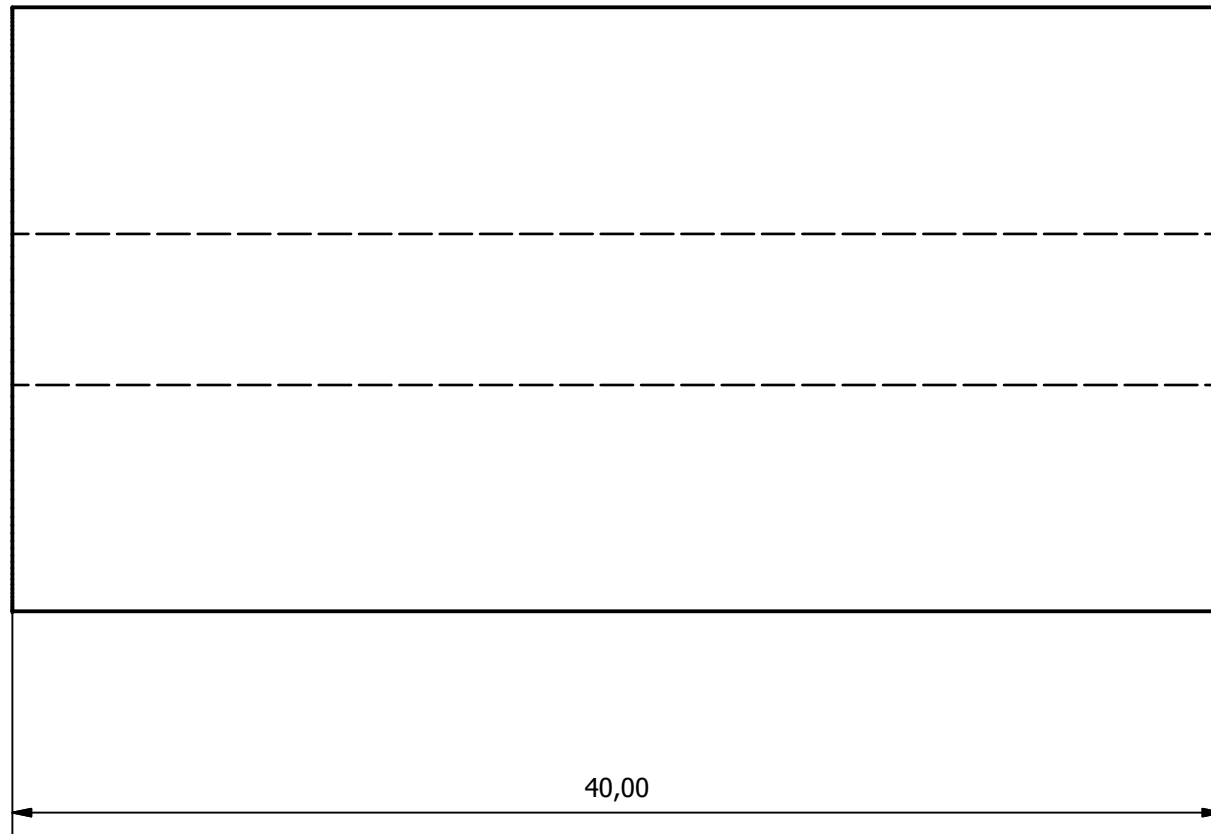
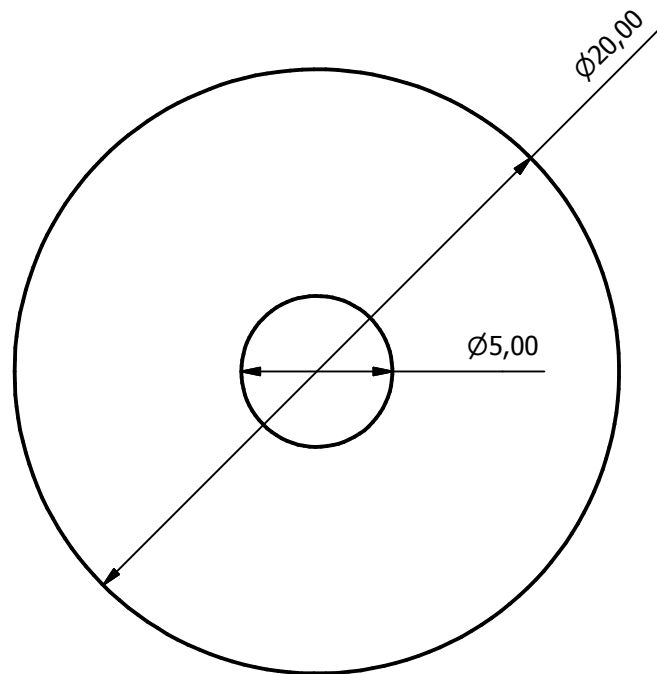


Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
Alumínio			Rolete Liso			
2 UNIDADES			desenhos finais		Edição	Folha
						50 / 55



Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
			desenhos finais		Edição	Folha
						51 / 55

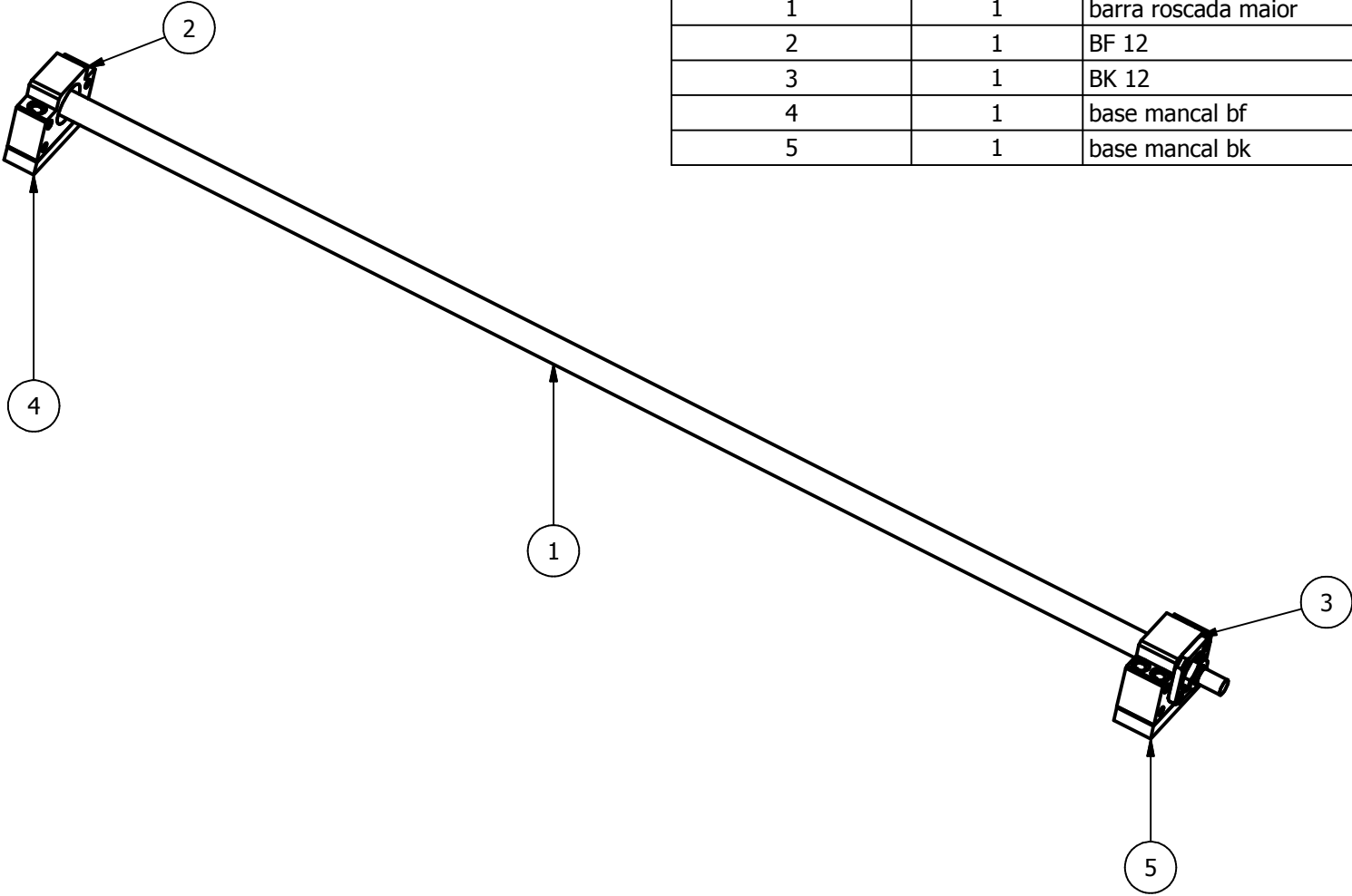




Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
			desenhos finais		Edição	Folha
						53 / 55



LISTA DE PEÇAS			
ITEM	QTD	NÚM. DE PEÇA	DESCRIÇÃO
1	1	barra roscada maior	comercial
2	1	BF 12	comercial
3	1	BK 12	comercial
4	1	base mancal bf	Pag. 23
5	1	base mancal bk	Pag. 22

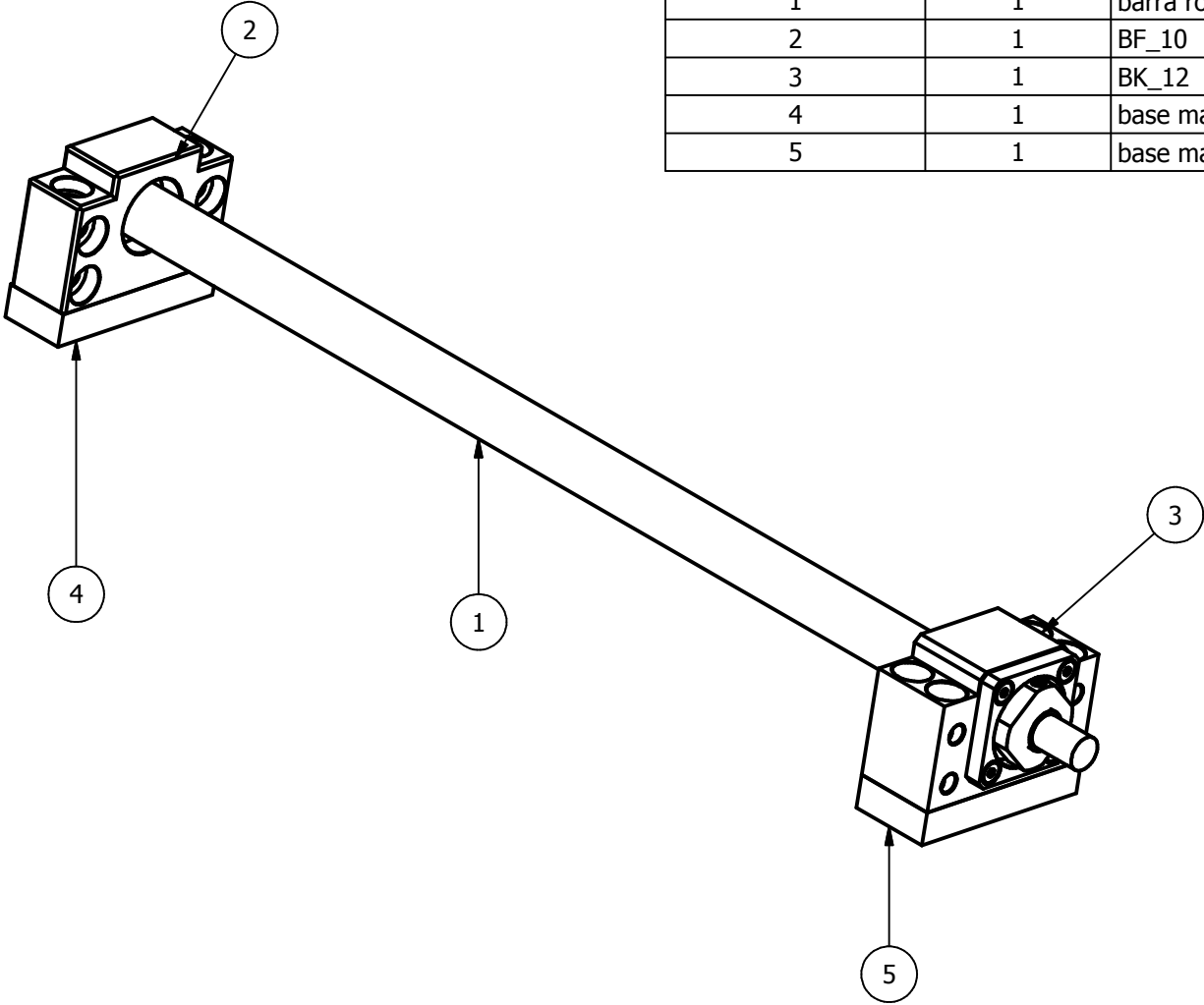


Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
			desenhos finais		Edição	Folha
						54 / 55





LISTA DE PEÇAS			
ITEM	QTD	NÚM. DE PEÇA	DESCRIÇÃO
1	1	barra roscada menor	comercial
2	1	BF_10	comercial
3	1	BK_12	comercial
4	1	base mancal bf	Pag. 23
5	1	base mancal bk	Pag. 22



Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data		Data	
Arthur						
			desenhos finais		Edição	Folha
						55 / 55

